



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**OPTIMALIZACE SLM PROCESU PRO VÝROBU
ÚSTOVÉHO ZAŘÍZENÍ ÚTOČNÉ PUŠKY**

OPTIMIZATION OF SLM PROCESS FOR MANUFACTURING OF ASSAULT RIFLE MUZZLE DEVICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kubrický

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jakub Kubrický**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace SLM procesu pro výrobu úst'ového zařízení útočné pušky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úst'ová zařízení palných zbraní vytváří při výstřelu korekční síly, které eliminují nežádoucí vliv působících sil od výstřelu jako je zdvih nebo zpětný ráz, nebo se snaží minimalizovat optické či hlukové projevy výstřelu. Současná úst'ová zařízení jsou nejčastěji jednoduchá jednoúčelová zařízení, která kompenzují konkrétní nežádoucí jev. Využití nekonvenčních tvarových prvků a možností aditivních technologií může zlepšit některé klíčové parametry nebo kombinovat funkce různých typů úst'ových zařízení do jednoho produktu.

Typ práce: výzkumná

Projekt: Vývojová zakázka (HS)

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je optimalizovat nastavení procesních parametrů při zpracování titanové slitiny TiAl6V4 technologií Selective Laser Melting pro výrobu ústředního zařízení s nízkou porozitou materiálu a dobrými mechanickými vlastnostmi.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat materiálové vlastnosti TiAl6V4 dosažitelné SLM technologií,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů,
- experimentálně stanovit statické a dynamické vlastnosti materiálu.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

FACCHINI, L., E. MAGALINI, P. ROBOTTI, A. MOLINARI, S. HÖGES a K. WISSENBAACH. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders. Rapid Prototyping Journal [online]. 2010, roč. 16, č. 6, s. 450–459. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552541011083371

KASPEROVICH, G. a J. HAUSMANN. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2015, roč. 220, s. 202–214. ISSN 0924-0136. Získáno z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.01.025

LEUDERS, S., M. THÖNE, A. RIEMER, T. NIENDORF, T. TRÖSTER, H.A. RICHARD a H.J. MAIER. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. International Journal of Fatigue [online]. 2013, roč. 48, s. 300–307. ISSN 0142-1123. Získáno z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá optimalizací výrobního procesu pro výrobu úst'ového zařízení útočné pušky. Pro optimalizaci byl vybrán materiál s označením Ti-6Al-4V, který je nejrozšířenější slitinou titanu. V úvodu práce jsou shrnuty dosavadní typy úst'ových řešení a je popsána technologie SLM se zaměřením na zpracování titanových slitin. Na základě rešerše byly navrženy metody optimalizace a jejich testování. První část práce je zaměřena na optimalizaci výrobního procesu pro zachování vysoké relativní hustoty vyráběných dílů. V druhé části bylo přistoupeno k samotnému testování mechanických vlastností při různých tepelných zpracování. Získané parametry pak byly použity pro návrh a výrobu úst'ového zařízení, které bylo reálně testováno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting (SLM), optimalizace technologických parametrů, tepelné zpracování, úst'ové zařízení, Ti-6Al-4V

ABSTRACT

The thesis deals with optimization of the manufacturing process of the muzzle device designed for assault rifle. The most common titanium alloy named Ti-6Al-4V was chosen for this task. The introduction summarizes previously existing types of muzzle devices and further describes the SLM technology with a special focus on titanium alloys processing. The optimization methods and their follow-up testing were designed according to theoretical knowledge that is summarized in the theoretical part of this work. Firstly, the aim was to describe the optimization of the manufacturing process with attention to preserving the relative density of the parts. Secondly, the mechanical properties of the parts that underwent different heat treatment were tested. The obtained data were then used to design and manufacture a muzzle device that underwent further testing in real condition afterwards.

KEY WORDS

Selective laser melting, optimization of technological parameters, heat treatment, muzzle device, Ti-6Al-4V

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBRICKÝ, J. *Optimalizace SLM procesu pro výrobu ústředního zařízení útočné pušky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 97 s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Těmito řádky bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavovi Vtípilovi, Ph.D. za zprostředkování a vedení této diplomové práce. Dále bych chtěl velmi poděkovat panu doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D. za cenné rady a připomínky v oblasti aditivní výroby kovových dílů. Na závěr bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Optimalizace SLM procesu pro výrobu ústředního zařízení útočné pušky* vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Jaroslava Vtípila, Ph.D. a pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

.....
Datum

.....
Podpis

OBSAH

OBSAH.....	13
1 ÚVOD	15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	16
2.1 Úst'ové zařízení.....	16
2.1.1 Zatěžování úst'ových zařízení.....	16
2.1.2 Možné řešení úst'ových zařízení.....	17
2.2 Technologie Selective Laser Melting	18
2.2.1 Parametry výroby	19
2.2.2 Nevýhody technologie SLM.....	20
2.3 Materiál pro výrobu úst'ového zařízení.....	24
2.3.1 Slitina Ti-6Al-4V.....	24
2.3.2 SLM parametry pro výrobu dílu ze slitiny Ti-6Al-4V	25
2.3.3 Tepelné zpracování slitiny Ti-6Al-4V	26
2.3.4 Oxidace Ti6Al4V za vyšších teplot.....	29
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
4 MATERIÁL A METODY	31
4.1 Použité zařízení.....	31
4.1.1 Použitý materiál	31
4.2 Optimalizace SLM procesu	33
4.2.1 Skenovací strategie	33
4.2.2 Měření porosity	34
4.3 Přesnost výroby.....	35
4.3.1 Tvar vzorků pro stanovení přesnosti	35
4.3.2 Studium povrchu	36
4.4 Zjištění mechanických vlastností.....	36
4.4.1 Tepelné zpracování.....	37
4.4.2 Oxidace vzorků.....	38
4.4.3 Tahová zkouška	38
4.4.4 Zkouška rázem v ohybu.....	39
4.4.5 Zkouška tvrdosti	39
4.4.6 Únavová zkouška.....	39
4.5 Metalografická analýza.....	40
4.6 Studium 3D struktur.....	40
4.6.1 Pevnost struktur v tlaku	41
5 VÝSLEDKY	43
5.1 Test výrobních parametrů	43
5.2 Tenkostěnné díly I	45
5.2.1 Vyhodnocení porosity	46
5.3 Studium povrchu.....	51
5.4 Tenkostěnné díly II	53
5.4.1 Vyhodnocení porosity	54
5.4.2 Tenké stěny.....	56
5.5 3D struktury	57
5.5.1 Porosita u struktur typu diamond	57
5.5.2 Zkouška v tlaku 3D struktur	58
5.6 Mechanické testování	59

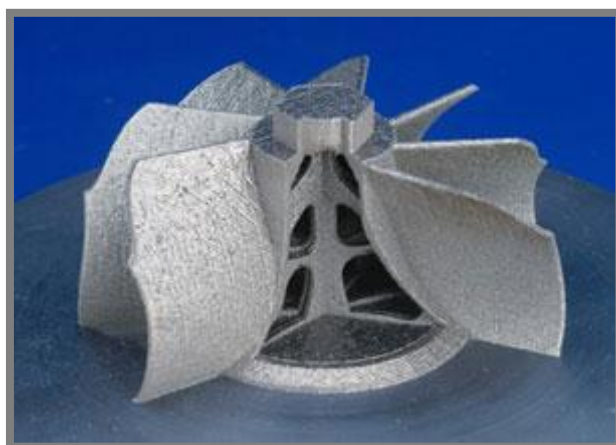
5.6.1	Tahová zkouška	59
5.6.2	Zkouška rázem v ohybu	60
5.6.3	Tvrдость	61
5.6.4	Vysokocyklová únava	62
5.7	Mikrostruktura	63
5.8	Výroba a testování úst'ového zařízení	65
6	DISKUZE	67
6.1	Optimalizace výrobního procesu	67
6.2	Použití tepelné zpracování	67
6.2.1	Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti	68
6.2.2	Oxidace titanové slitiny	68
6.3	Vliv porosity na únavovou životnost	68
7	ZÁVĚR	70
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	74
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	75
11	SEZNAM TABULEK	77
12	SEZNAM PŘÍLOH	78

1 ÚVOD

Technologie Selectiv Laser Melting (SLM) je aditivní způsob výroby, která je čím dál více rozvíjena a požadována v různých odvětvích strojírenství. Jedná se o výrobu dílů, které vznikají spékáním jednotlivých vrstev kovového prášku, a díky tomu je možné vyrobit tvarově složitý výrobek, který je jiným způsobem jen těžko vyrobitelný viz Obr. 1-1. Použitím této technologie je možné vyrobit speciální strukturovaný díl, který si zachovává potřebnou pevnost a zároveň vyniká nízkou hmotností. Díly vyrobené touto technologií jsou využívány např. v letectví, kosmonautice, nebo v automobilových sportech, kde je důležité snižovat hmotnost použitých komponent. Jelikož výsledná kvalita vyrobeného dílu je značně ovlivněna volbou výrobních parametrů, je důležité nalézt a ověřit takové parametry, které zajistí bezporuchový provoz navržené součásti. Volba parametrů je převážně volena na základě zkušeností získaných z mnoha různých testů. Nevýhoda takto vyrobených dílů je výskyt pórů, což značně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti. Před výrobou samotných dílů je tedy nutné odladit výrobní proces tak, aby vznikl díl kvalitativně srovnatelný s díly vyrobené konvenčními technologiemi.

Společnost Česká zbrojovka se rozhodla otestovat technologii 3D tisku kovových dílů na výrobu úst'ového zařízení útočné pušky. Úst'ové zařízení umožňuje snižovat nebo zcela potlačit povýstřelové charakteristiky zbraně, jako jsou: záblesk, zpětný ráz a vysoký hluk. V současné době je díky použití konvenčních postupů možné eliminovat maximálně dva z uvedených jevů. Proto bylo přistoupeno k použití technologie SLM, která umožňuje „tvarovou volnost“ při návrhu úst'ového zařízení, což umožní minimalizovat více nežádoucích jevů najednou.

První část práce je zaměřena na optimalizaci výrobních parametrů pro zachování minimální porosity. Druhá část je věnována mechanickému testování použitého materiálu, které budou dále použity pro návrh úst'ového zařízení. Cílem práce není návrh konstrukce úst'ového zařízení, ale pouze optimalizace vhodných výrobních procesů technologie SLM a jejich ověření pomocí mechanických zkoušek.



Obr. 1-1 Příklad použití technologie SLM [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Úst'ové zařízení

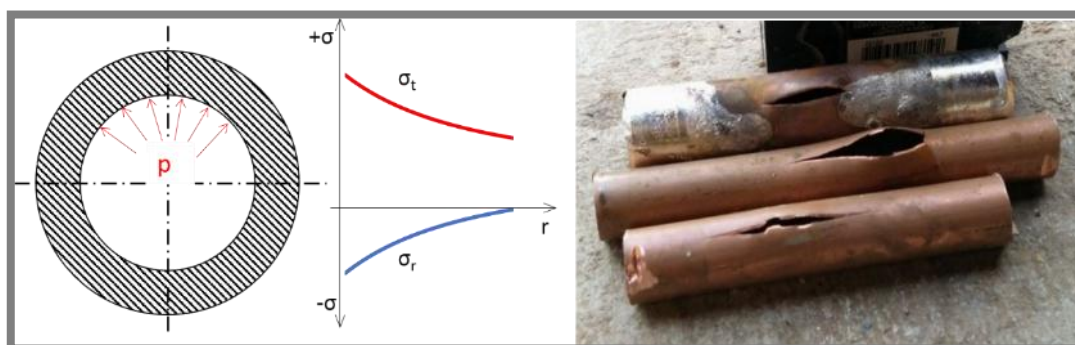
Úst'ové zařízení pušky je komponenta, která ovlivňuje chování zbraně při výstřelu. Mezi základní druhy úst'ových zařízení řadíme úst'ové brzdy, mechanické tlumiče plamene a tlumiče hluku [2]. Pro lepší maskování střelce jsou v armádě využívány tlumiče hluku a plamene, které fungují na principu snižování energie vylétujících plynů z hlavně [3]. Úst'ová brzda vhodným usměrněním spálených plynů snižuje zpětný ráz, což vede k rychlejšímu zamíření a zvýšení přesnosti střelby. Tvary úst'ových zařízení jsou nejčastěji rotačně symetrické tenkostěnné díly viz Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Tlumič hluku [4]

2.1.1 Zatěžování úst'ových zařízení

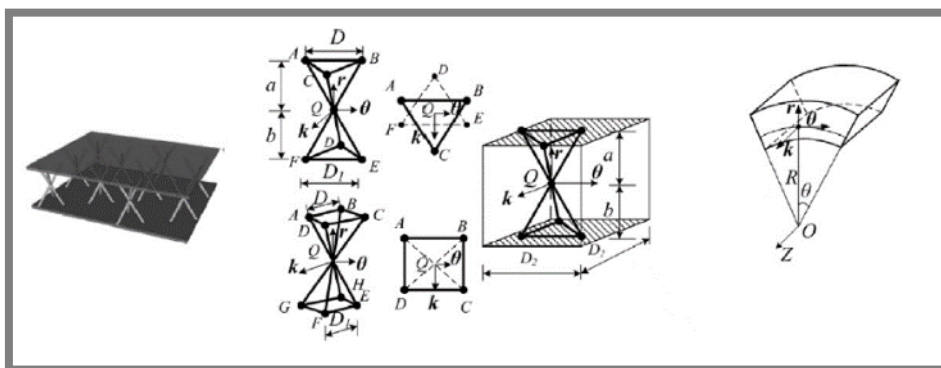
Jelikož je střela urychlována expanzí prachových plynů, jsou stěny hlavně a úst'ového zařízení zatěžovány ve formě vnitřního přetlaku. **Fišer [5]** uvádí, že pro výpočet napětí v hlavni je možné ji nahradit válcovým tělesem, což umožňuje použití analytických výpočtů. Z pružnosti a pevnosti elementárních prvků vyplývá, že velikost tečného napětí je vyšší než radiální. Tento jev lze pozorovat jak u poškozených hlavní, tak i u přetlakových trubek kde se trhлина šíří ve směru osy hlavně. Na Obr. 2-2 lze vidět průběh složek napětí v závislosti na poloměru a příklady poškozených trubek.



Obr. 2-2 Průběhy složek napětí, poškození trubek vlivem vnitřního přetlaku [6]

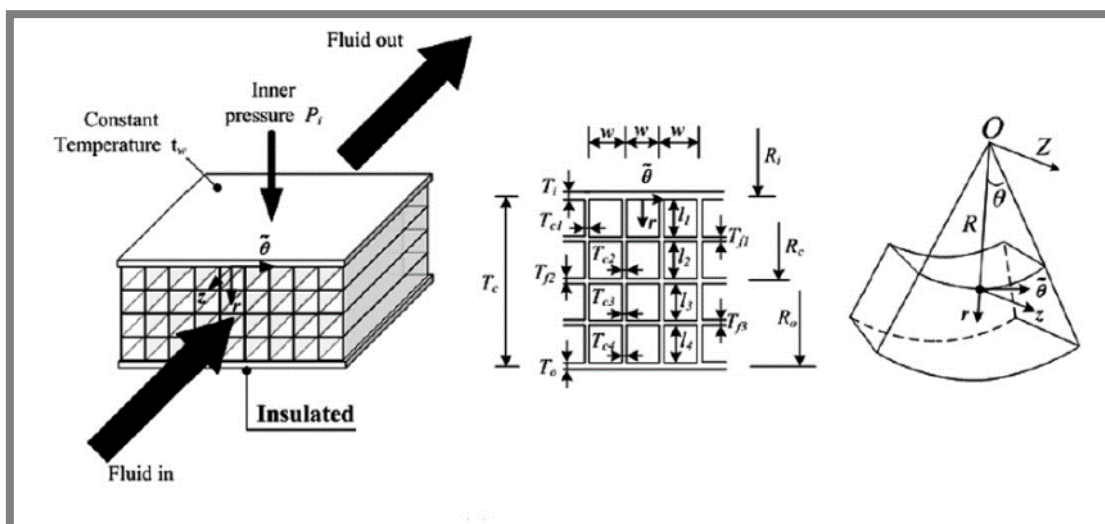
2.1.2 1Možné řešení úst'ových zařízení

Jak již bylo řečeno v úvodu, technologie SLM umožňuje výrobu tvarově složitých dílů což lze využít u výplně válcové stěny ústového zařízení vhodnou strukturou. Ta umožňuje snížení hmotnosti a zároveň zachování požadované tuhosti. **Liu et al. [7]** zkoumal různé druhy struktur válcových těles, které podrobil pevnostní analýze. Po analytickém výpočtu dosahuje nejlepších výsledků struktura, která je vyobrazena na Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Struktura dosahující nejvyšší pevnosti [7]

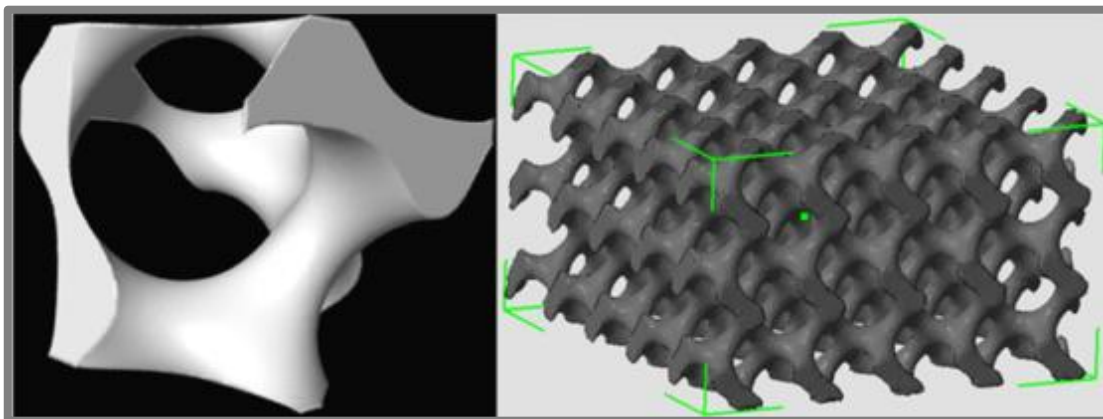
Další výhodnou vlastností těchto struktur je jejich možnost chlazení, jelikož v prostoru mezi jednotlivými vrstvami může proudit chladicí médium. Tuto vlastnost je možné využít i při návrhu úst'ového zařízení, které je vlivem výstřelu zahříváno. **Liu et al. [8]** zkoumal další druhy struktur, které zachovávají nízkou váhu a dobrý odvod tepla. Řešení bylo prováděno analyticky, a proto byly zkoumány pouze struktury kde bylo zajištěno laminární proudění. Nejvýhodnější struktura je znázorněna na Obr. 2-4.



Obr. 2-4 Struktura umožňující vysoký odvod tepla [8]

Mimo funkci, pro které jsou uvedené typy optimalizovány, je lze využít i pro samotnou funkci úst'ového zařízení. Jelikož úst'ové zařízení funguje na principu snižování energie spálených plynů [3], je možné část energie předat do turbulentního proudění při obtékání složitých struktur. Další výhodnou strukturou může být tzv. gyroidní struktura. Tímto tvarem struktur se ve své práci zabývá **Yan et al. [9]**, kde zkoumá

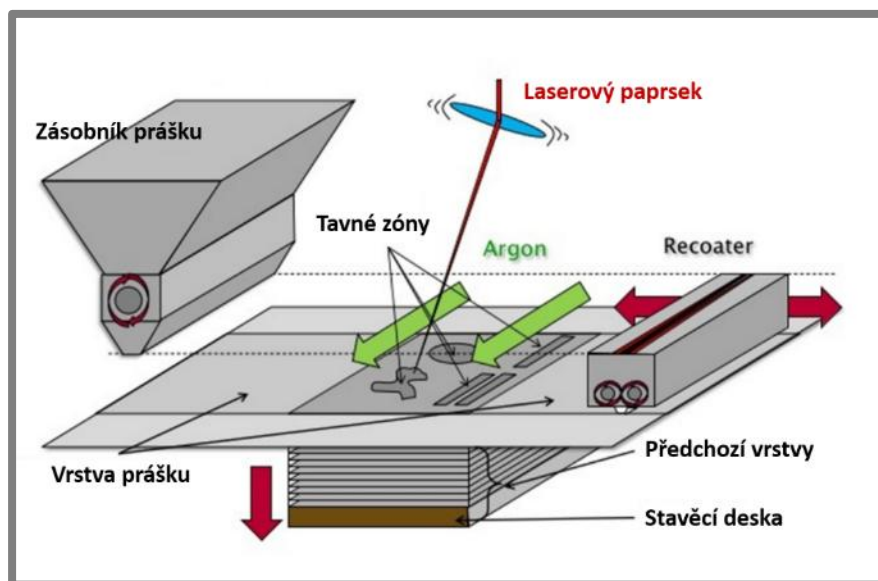
jejich vyrobitelnost pomocí SLM a také jejich pevnost při tlakové zkoušce. Příklad gyroidní struktury názorně zobrazuje Obr. 2-5. Z jeho práce je patrné, že tyto struktury jsou vyrobitelné i bez podpůrných struktur. Nevýhoda těchto struktur je, že k jejich povrchu je nataven prášek, který výrazně zvyšuje jeho drsnost.



Obr. 2-5 Příklad gyroidní struktury [9]

2.2 Technologie Selective Laser Melting

Selective Laser Melting je aditivní způsob výroby, při které díl vzniká po vrstvách. SLM spadá do kategorie tzv. „Powder Bed Systems“ [10], kde je prášek rozprostřen přes celou stavěcí plochu a již hotový díl je pak obklopen nepoužitým práškem. Díl je vytvořen přímo na základě 3D modelu z hotoveného v některém z mnoha CAD softwaru např. Inventor, SolidWorks apod. díky čemuž je možné rychle vyrobit tvarově složité díly, které jsou jinými metodami nevyrobitelné. Výrobní proces začíná nanášením první vrstvy kovového prášku na výrobní platformu k čemuž slouží nanášecí zařízení (recoater). Přesným pohybem laserového paprsku vznikají jednotlivé návary čímž je vytvořena souvislá vrstva reálného objektu [11]. Pohyb laseru je řízen naklápěním soustavy přesných zrcadel. Poté se platforma posune o výšku jedné vrstvy směrem dolů (tloušťka závisí na použitém prášku) a vznikne tak prostor pro nanášení další vrstvy. Tímto vrstvením vzniká plno objemový 3D objekt. Princip výroby lze vidět na Obr. 2-6. Touto technologií je možné zpracovat širokou škálu materiálu jako jsou například slitiny hliníku, oceli, či titanu. Při použití reaktivních kovů je nutné zaplavit stavěcí komoru ochranným plynem (nejčastěji argon). Na každý materiál je nutné nalezení originálních výrobních procesů, jelikož každý materiál má jinou teplotu tavení, nebo může částečně odrážet záření paprsku a snižovat tak teplotu taveniny. Nesprávné nastavení pak může vést ke zhoršení kvality jednotlivých návarek [12].

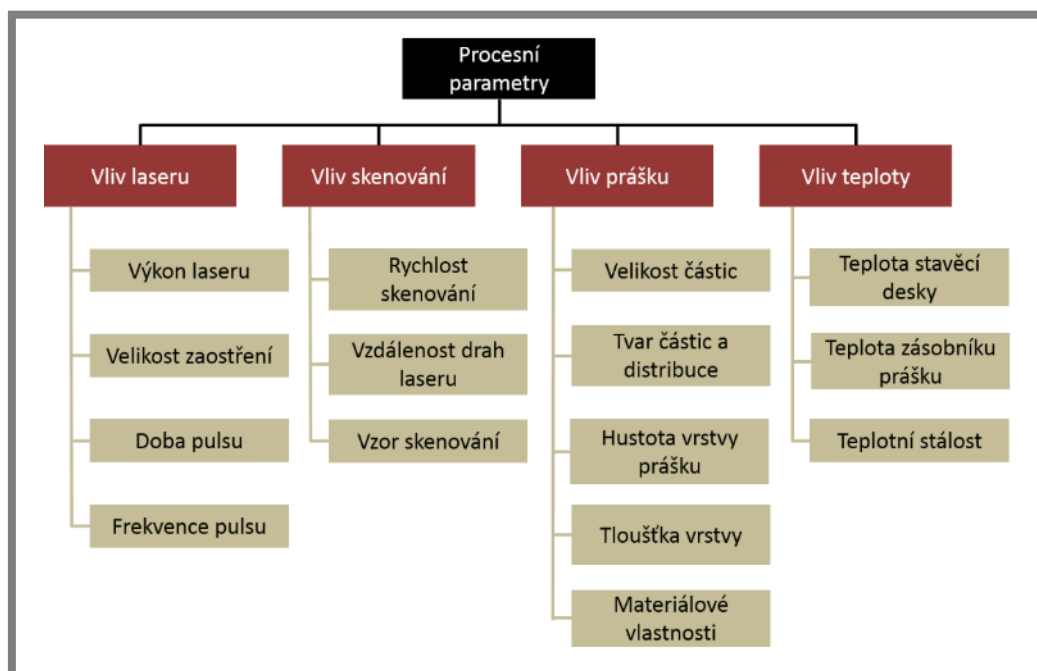


Obr. 2-6 Schéma procesu výroby [13] (přeloženo)

2.2.1 Parametry výroby

Výrobní proces ovlivňuje několik faktorů např. výkon laseru, rychlost skenování, teplota platformy, tepelná vodivost prášku apod. Z tohoto důvodu není jednoduché stanovit optimální parametry, které zajistí výrobu bez výskytu vad v materiálu. Rozdílné kvality dílů mohou dokonce ovlivnit i jejich geometrie, např. z důvodu tepelné vodivosti malých dílů. Ke zjištění optimálních výrobních parametrů zpravidla předchází série testů [14]. Faktory, které mohou ovlivnit výslednou výrobu dílu názorně zobrazuje Obr. 2-7.

2.2.1



Obr. 2-7 Procesní parametry SLM [14] (přeloženo)

Základní parametry, které výrazně ovlivňují kvalitu dílů, tedy výkon laseru, rychlost skenování, vzdálenost drah laseru a tloušťka vrstvy, spolu uvádějí hodnotu objemové energie, která se vypočítá ze vztahu:

$$E_V = \frac{P}{v_s \cdot h_D \cdot t_L} \text{ [J/mm}^3\text{]}$$

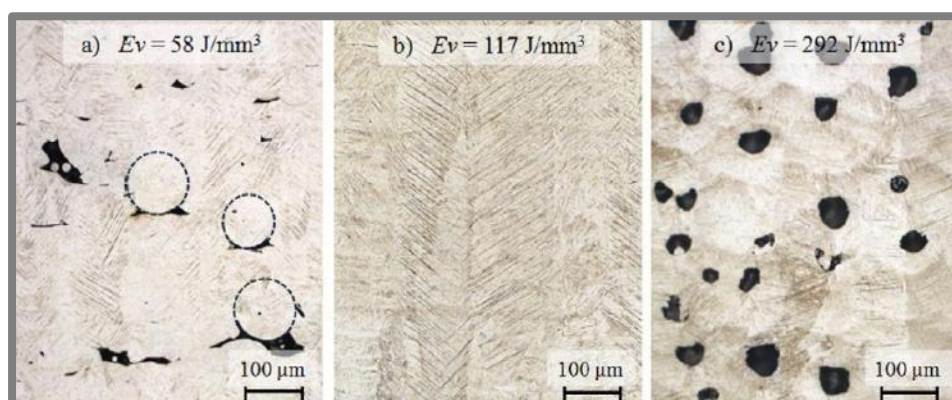
kde:

E_V	[J/mm ³]	-objemová energie
P	[W]	-výkon laseru
v_s	[mm/s]	-skenovací rychlost
h_D	[mm]	-vzdálenost drah laseru (hatch distance)
t_L	[mm]	-tloušťka vrstvy

2.2.2 Nevýhody technologie SLM

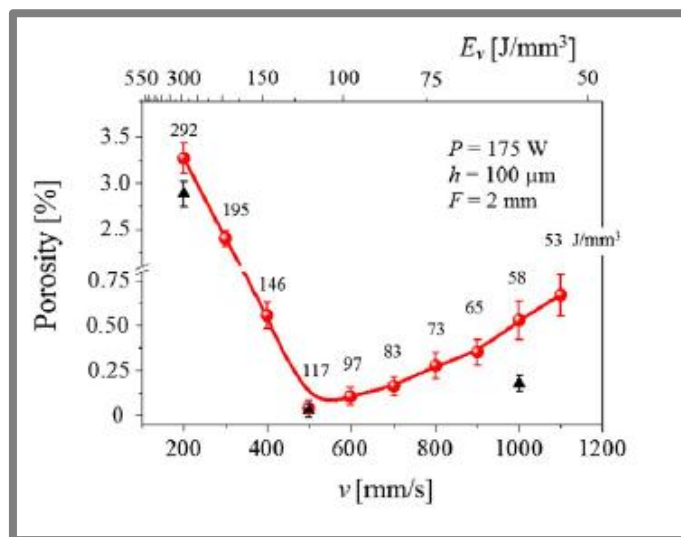
Porosita

Hlavním úskalím dílů vyrobených technologií SLM je výskyt pórů, které se dělí na dva druhy. První typ vzniká nedostatečným množstvím energie dodávaným na roztavení materiálu, čímž vznikají dutiny s neroztaveným práškem. Geometrie těchto pórů je značně složitá a na jejich ostrých hranách může vznikat koncentrace napětí, které pak ovlivní mechanické vlastnosti. Další skupinou jsou póry metalurgické, které vznikají příliš vysokou hodnotou energie dodanou do procesu výroby. Charakteristickým tvarem těchto pórů jsou sférické objekty různých velikostí. Jedná se o bubliny plynu, které jsou uvězněny uvnitř struktury. Výskytem těchto pórů se ve své práci zabývá **Kassperovich et al. [15]**, který zkoumá výskyt a tvar pórů v závislosti na použití procesních parametrů u titanové slitiny. Tvar dutin v závislosti na velikosti objemové energie lze vidět na Obr. 2-8.



Obr. 2-8 Druhy pórů v závislosti na objemové energii [15]

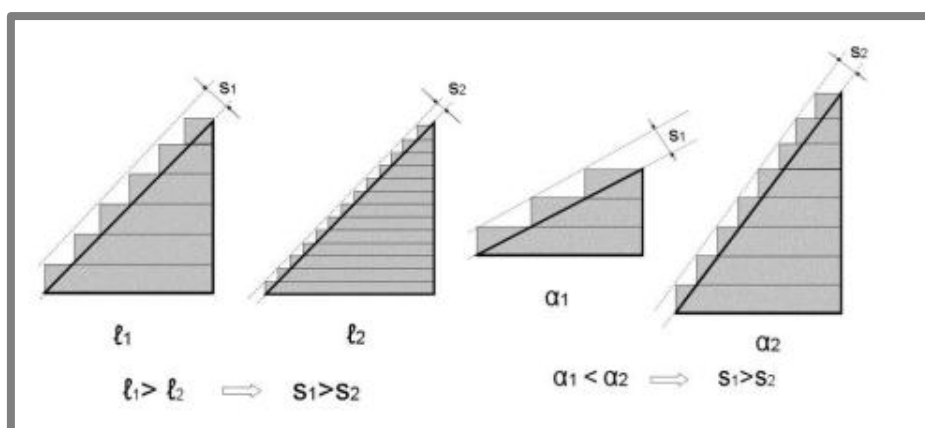
Jev výskytu porosity v závislosti na množství energie lze také využít při hledání optimálních procesních parametrů. Jak lze vidět z Obr. 2-8 perspektivní oblast se nachází mezi oblastmi s výskytem obou druhů pórů. Podle tvaru pórů a vynesení porosity do grafu lze určit v jaké oblasti se nacházíme a tím upravovat parametry výroby pro zachování minimální porosity jako zobrazuje Obr. 2-9.



Obr. 2-9 Vliv porosity na rychlosti skenování [15]

Drsnost povrchu

Jelikož stavba dílů vzniká kladením jednotlivých vrstev na sebe, které jsou spékány za vysoké teploty, vznikají určité problémy. Prvním je výskyt velké drsnosti šikmých ploch [16], kde drsnost roste s velikostí vrstvy, a naopak klesá se zvětšováním stavěcího úhlu viz Obr. 2-10.

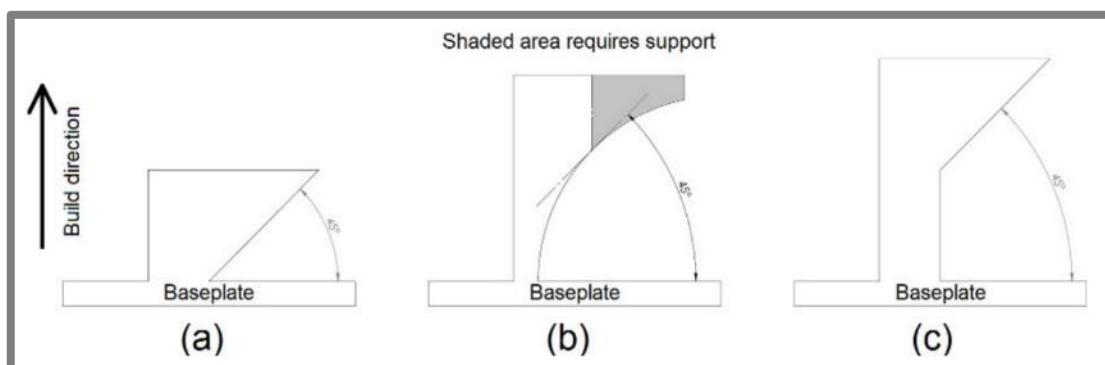


Obr. 2-10 Princip výskytu drsnosti při výrobě šikmých ploch [16]

Další ovlivnění drsnosti povrchu nastává při natavení okolního prášku na stěny vyráběného dílu. Proto lze zhoršený povrchu nalézt i u kolmých stěn. V závislosti na množství nataveného prášku je pak ovlivněna i rozměrová přesnost.

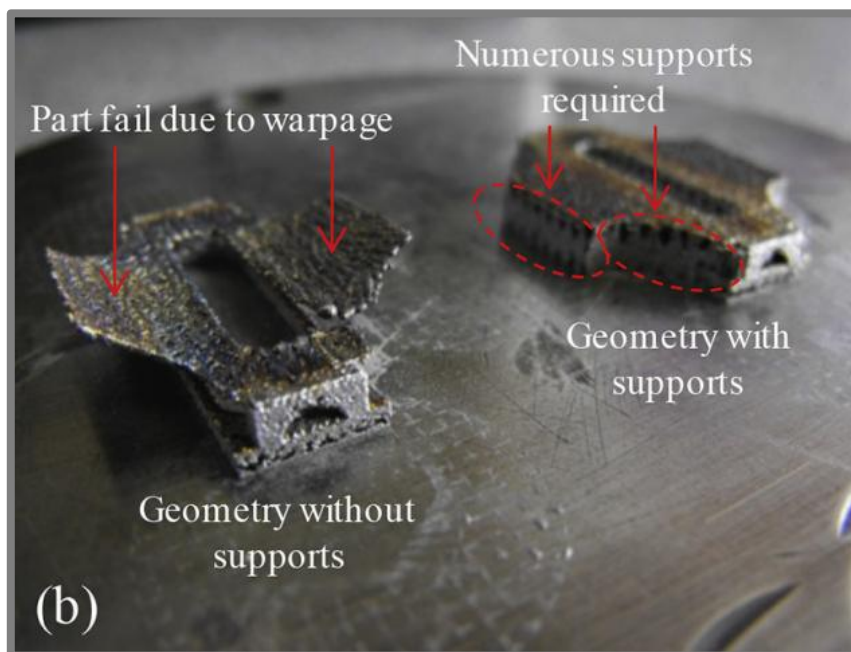
Podpůrné struktury

Další nevýhodou může být nutnost výroby podpůrných struktur u dílů, kde je překročen úhel samonosnosti viz Obr. 2-11. Výroba těchto struktur má za následek prodloužení výroby a větší spotřebu prášku. Na podpůrné struktury jsou kladeny nároky i na únosnost, protože při stavbě dílů vlivem tepelného smrštění může vznikat vnitřní napětí, které musí přenést právě zmiňované struktury.



Obr. 2-11 Vliv stavěcího úhlu na nutnost struktur [17]

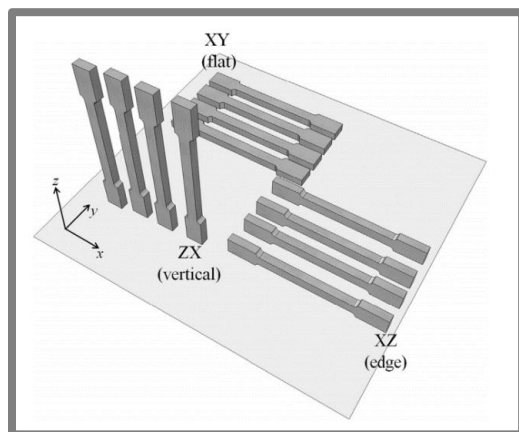
Vora et al. [18] zkoumal vliv podpůrných struktur při výrobě vodorovné desky. Vlivem tepelné roztažnosti se deska ohýbá a vystupuje nad vrstvu prášku. Při velké deformaci dílu může dojít k poškození nanášecího zařízení (viz Obr. 2-12). V softwaru pro přípravu výroby je k volbě těchto struktur připravena knihovna s několika typy struktur, které zamezí vzniku tohoto nepříznivého jevu. Deformaci vyráběného dílu je možné snížit vyhříváním stavěcí platformy, kde je teplota závislá na použitém materiálu.



Obr. 2-12 Vliv podpůrných struktur na deformaci desky [18]

Vliv orientace stavby

Dalším nežádoucím jevem, který se vykytuje u dílů vyrobených technologií SLM jsou různé mechanické vlastnosti v závislosti na orientaci dílů při stavbě. **Simonelli et al. [19]** ve své práci zkoumá vliv orientace stavby dílů ze slitiny Ti6Al4V a porovnává výsledky z tahové zkoušky. Rozmístění vzorků na platformě ukazuje Obr. 2-13 a výsledky jsou shrnuty v Tab. 2-1.



Obr. 2-13 Orientace stavby vzorků podle [19]

Tab. 2-1 Výsledky tahových zkoušek

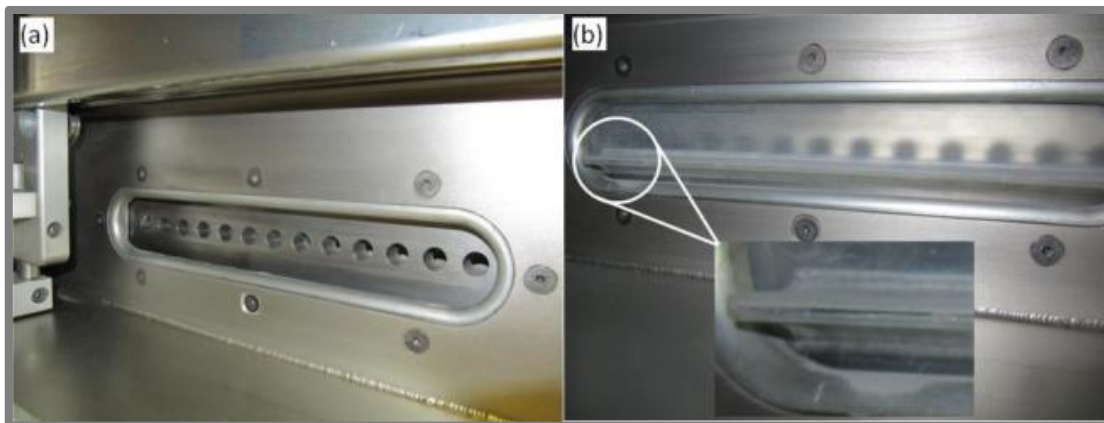
Build orientation	E [GPa]	σ_y [MPa]	UTS [MPa]	ϵ fracture [%]
XZ	115±6	978±5	1143±6	11,8±0,5
ZX	119±7	967±10	1117±3	8,9±0,4
XY	113±5	1075±25	1199±49	7,6±0,5

Z výsledků vyplývá, že nejlepších hodnot dosahuje orientace s označením XY. Při navrhování stavby dílů spolu s předpokládaným směrem největšího zatížení je důležité zvažovat i vliv orientace stavby na výsledné mechanické vlastnosti výrobku.

Vliv umístění na platformě

Práce autorů **Ladewig et al. [20]** je zaměřena na studium negativních procesů při vytváření tavné lázně u technologie SLM. Při tavení materiálu lze pozorovat rozstřík kappek roztaveného materiálu, který je poté unášen v proudu inertního plynu. Převážná část je plynem odstraněna ze stavěcího prostoru, ale některé částice zůstanou ve stavěcím prostoru a opět se zúčastní přeměny na kapalnou fázi. Tímto jevem je poté ovlivněna výsledná kvalita vyráběného dílu. Autoři dále uvádí vliv proudu ochranné atmosféry na šířku tavné lázně. Jestliže je vyráběný díl umístěn blíže k ústí ochranné atmosféry, je více ochlazován a tím se zužuje šířka tavné lázně. Důvodem je částečná přeměna energie na ohřátí ochranné atmosféry.

Úpravou ústí ochranné atmosféry pro odstranění vlivu umístění na výrobní platformě se zabývali **Kong et al. [21]**. Vhodnou úpravou trysek inertního plynu docílili stejné kvality všech vzorků umístěných na platformě. Úpravu lze vidět na Obr. 2-14 kde místo původních otvorů použily úzkou štěrbinu. Pro výzkum byla použita titanová slitina.



Obr. 2-14 Použitá úprava trysek (a) stávající stav, b) úzká štěrbinu [21]

2.3 Materiál pro výrobu úst'ového zařízení

Po porovnání materiálů, ze kterých je běžně technologií SLM vyráběno na ústavu konstruování a materiálu, který společnost používá k výrobě úst'ového zařízení bylo rozhodnuto, že pro další optimalizaci bude nejvýhodnější použít titanovou slitinu s označením Ti6Al4V. Tento materiál má přibližně stejné mechanické vlastnosti jako stávající materiál používaný ve společnosti CZUB. Porovnání materiálů názorně ukazuje Tab. 2-2. Při výběru materiálu napomohl také fakt, že z titanové slitiny se již některé úst'ové zařízení pomocí konvenčních technologií vyrábí. Podrobnější popis tohoto materiálu je uveden v kapitole níže.

Tab. 2-2 Porovnání materiálů

	Stávající užívaná vysokopevnostní ocel	Ocel 1.4404	Ti6Al4V
Tvrdost HRC	36–39		
Mez pevnosti [MPa]	1 100–1 220	580–930	900–1 170
Mez kluzu [MPa]	1 000–1 100	200–380	830–1 100
Tažnost [%]	13,5–15,8	30	10–14
Rázová houževnatost [KV]	72–42	100–60	95–162

2.3.1 Slitina Ti-6Al-4V

Titanová slitina Ti-6Al-4V je nejrozšířenější slitinou titanu. Vyznačuje se nízkou hustotou ($4\,430\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a vysokou pevností [22]. Její předností je vysoká odolnost proti korozi a také odolnost vůči vysokým teplotám. Právě tyto vlastnosti umožňují použití

slitiny titanu pro výrobu součástek do extrémních podmínek, jako jsou například díly ve zbraňovém průmyslu nebo v proudových motorech. Další výhodou je možnost zpracování technologií SLM, které jsou poté často využívány v lékařství, kvůli jejich biokompatibilitě.

2.3.2 SLM parametry pro výrobu dílu ze slitiny Ti-6Al-4V

2.3.2

Základním výzkumem procesních parametrů pro slitinu Ti-6Al-4V se ve práci zabývá **Cardaropoli et al. [23]**. Pro analýzu byly vyrobeny kruhové vzorky, na kterých byla zkoumána porosita. Z testovací série dosahovala nejnižší porosita hodnoty 1,2 % a to při výkonu laseru 170 W a skenovací rychlosti 1,25 m/s. Další parametry jsou uvedeny v Tab. 2-3. Tyto parametry poté použil **Campanelli et al. [24]** pro výrobu několika druhů struktur, kde některé vzorky byly zpevněny tlustostěnnými pruty, čímž dokázal výrobu jak tenkostěnných, tak i plnoobjemových dílů.

Tab. 2-3 Použité výrobní parametry [23]

Laser power	170 W
Scan speed	1,25 m/s
Hatch spacing	0,1 mm
Scan length	5 mm
Layer thickness	30 μ m

Vrancken et al. [25] ve své práci pro výrobu dílů z titanové slitiny použil parametry, které uvádí Tab. 2-4. Tyto parametry použil, pro zachování minimální porosity a dobré kvalitu vyrobených vzorků. Pro skenování byla použita strategie „zigzag“, tedy kdy sousední dráhy laseru jsou vůči sobě pootočený o 180 °. Natočení další vrstvy vůči předchozí je o 90 °.

Tab. 2-4 Použité výrobní parametry [25]

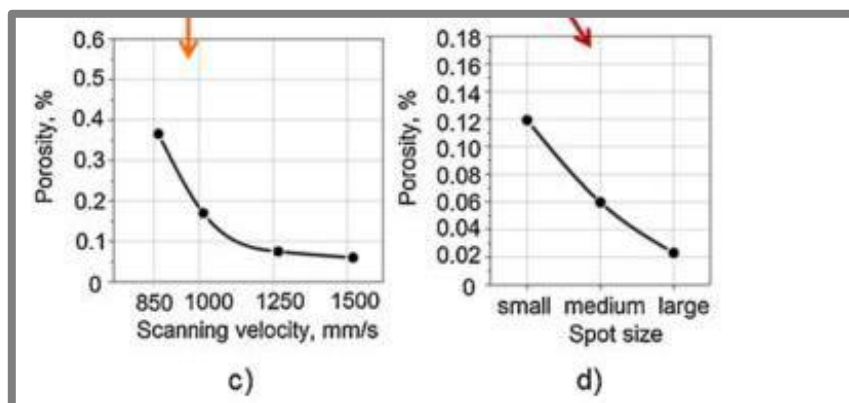
Laser power	250 W
Scan speed	1,6 m/s
Hatch spacing	0,06 mm
Layer thickness	30 μ m

Jiné procesní parametry s tloušťkou vrstvy 50 μ m pro výrobu objemových dílů použil **Simonelli et al. [19]** viz Tab. 2-5. Laserem byly nejprve navrženy okrajové části každého průřezu a poté vnitřní plochy s paralelním střídáním vektorů skenování o 67 °. Následně bylo laserem skenovány okraje dílu pro zlepšení povrchu vyráběného dílu.

Tab. 2-5 Použité parametry [25]

Laser power	157 W
Scan speed	225 mm/s
Hatch spacing	100 μ m
Layer thickness	50 μ m

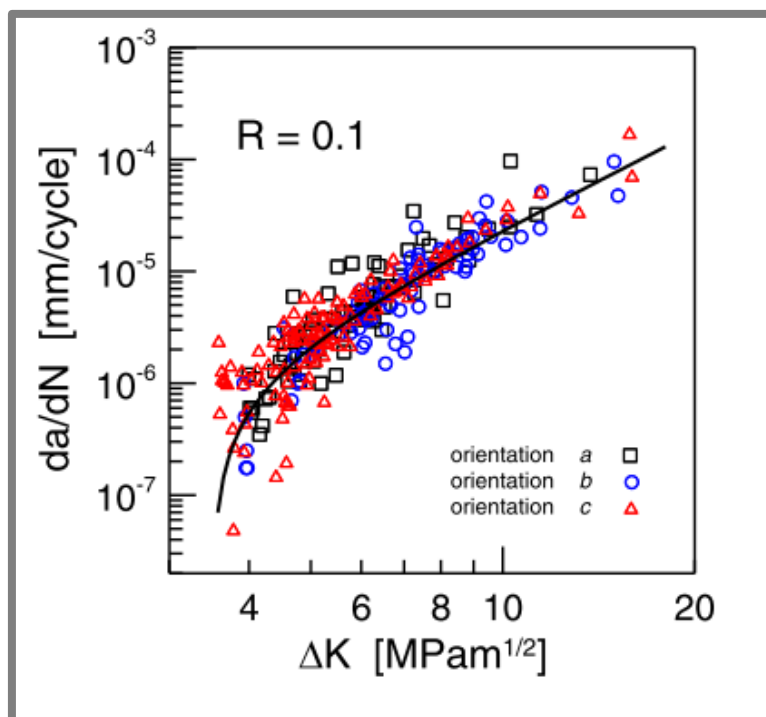
Kasperovich et al. [26] zkoumal vliv skenovací rychlosti a zaostření laseru (150 – 250 μm) na porositě vzorků. Pro přesnější zhodnocení byly póry zkoumány v celém objemu vzorku. Na Obr. 2-15 lze vidět závislost těchto parametrů na výskytu pórů při konstantním výkonu laseru (200 W) a tloušťce vrstvy (40 μm). Z práce lze jednoznačně určit vhodné výrobní parametry zajišťující minimální porositu, které je možné použít při vlastním testování porosity. Po optimalizaci výrobních parametrů dále zkoumal vliv povrchu na mechanické vlastnosti, které byly zjišťovány tahovou zkouškou obrobených i neobrobených vzorků. Z analýzy vyplývá, že jestliže není díl obroben lze očekávat vlivem drsnosti povrchu zhoršení meze pevnosti o 9 %.



Obr. 2-15 Závislost výrobních parametrů na porositě [26]

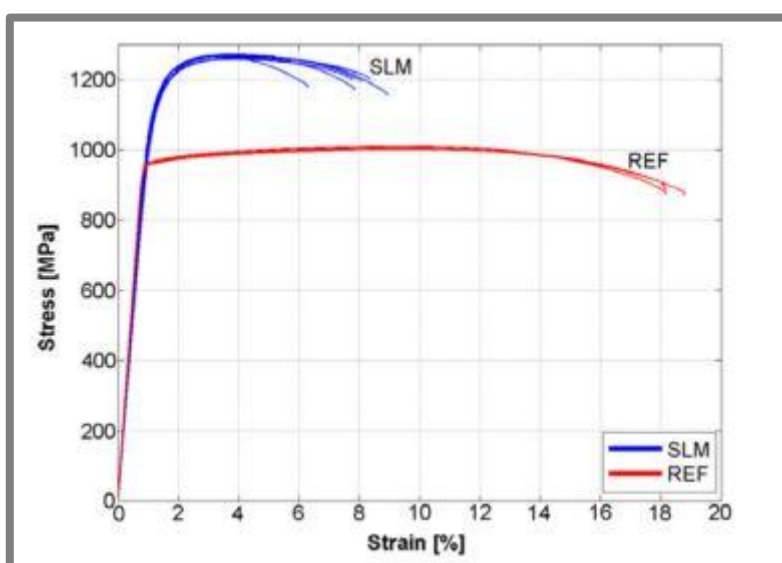
2.3.3 Tepelné zpracování slitiny Ti-6Al-4V

Při rychlém zchlazení, kterým je doprovázena výroba dílu pomocí SLM, je výrazně ovlivněna mikrostruktura materiálu, což se může negativně projevit na výsledných mechanických vlastnostech. Z tohoto důvodu je důležité použití vhodných tepelných zpracování, které zajistí zlepšení požadovaných mechanických vlastností. Díly vyrobené technologií SLM doprovází zvýšené zbytkové napětí, které lze odstranit žiháním. Tím se ve své práci zabýval **Knowles et al. [27]**, který použil rekrystalizační žihání za teploty 950 °C po dobu 1 h a ochlazením v peci. Zbytkové napětí tím snížil až o 97 %. Při požadavku, aby nebyla změněna původní struktura, je nutné použití nižších žihacích teplot. Práce autorů **Konečná et al. [28]** uvádí žihání vzorků při teplotě 380 °C po dobu 8 h, které jsou poté cyklicky zatěžovány. Z jejich výzkumu vyplývá, že po takto tepelně zpracovaném vzorku je vliv orientace stavby proti odolnosti růstu trhliny nevýrazný viz Obr. 2-16.



Obr. 2-16 Vliv orientace stavby na růst trhliny [28]

Vrancken et al. [25] uvádí vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti zjištěné tahovou zkouškou a naměřené hodnoty porovnává s referenčním materiálem z čehož lze jednoznačně potvrdit výrazné teplotní ovlivnění dílů viz Obr. 2-17 a Obr. 2-18. U SLM dílů lze očekávat zvýšení meze kluzu a meze pevnosti, na druhou stranu však klesá tažnost. Tato vlastnost je způsobena rychlým zchladnutím taveniny, čímž vzniká křehká martenzitická struktura. Změnou mikrostruktur a jejich vlivu na výsledné mechanické vlastnosti se ve své práci zabývá **Becker et al. [29]**. Autoři také vyzkoušeli tepelné zpracování za zvýšeného tlaku (metoda HIP), kterým může být dokonce i zvýšená relativní hustota dílu.



Obr. 2-17 Porovnání referenčního a SLM materiálu [25]

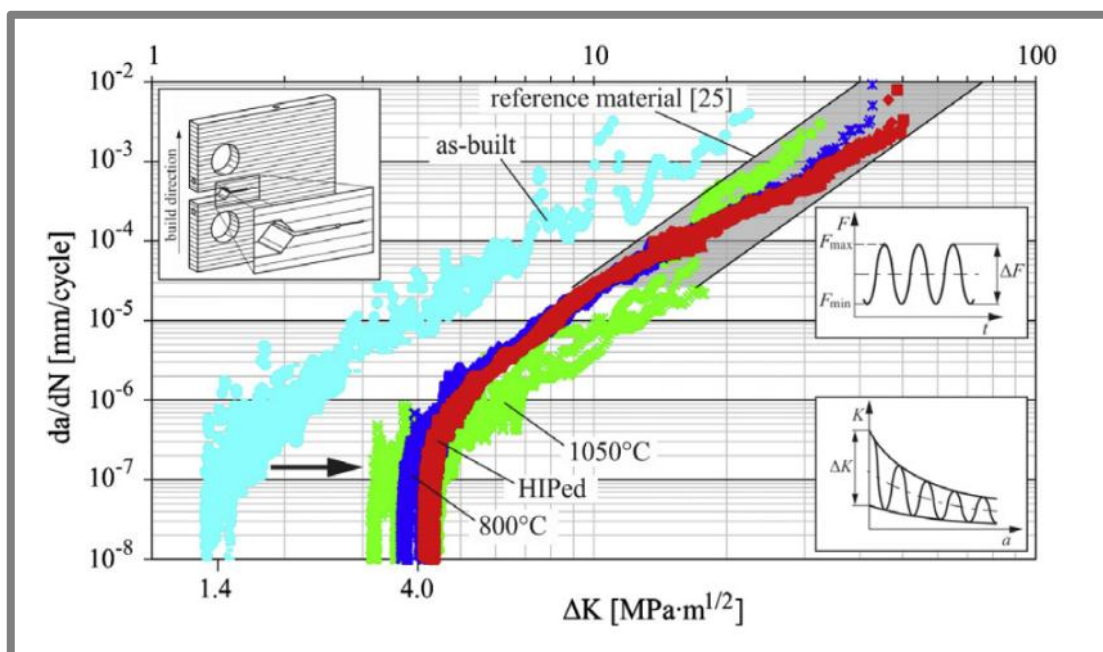
Nr.	T (°C)	t (h)	Cooling rate	E (GPa)	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	$\epsilon_{fracture}$ (%)
1	540	5	WQ	112.6 ± 30.2	1118 ± 39	1223 ± 52	5.36 ± 2.02
2	850	2	FC	114.7 ± 3.6	955 ± 6	1004 ± 6	12.84 ± 1.36
3	850	5	FC	112.0 ± 3.4	909 ± 24	965 ± 20	– (premature failure)
	1015	0.5	AC				
4	followed by			114.9 ± 1.5	801 ± 20	874 ± 23	13.45 ± 1.18
	843	2	FC				
5	1020	2	FC	114.7 ± 0.9	760 ± 19	840 ± 27	14.06 ± 2.53
6	705	3	AC	114.6 ± 2.2	1026 ± 35	1082 ± 34	9.04 ± 2.03
	940	1	AC				
7	followed by			115.5 ± 2.4	899 ± 27	948 ± 27	13.59 ± 0.32
	650	2	AC				
	1015	0.5	AC				
8	followed by			112.8 ± 2.9	822 ± 25	902 ± 19	12.74 ± 0.56
	730	2	AC				

Obr. 2-18 Porovnání tepelných zpracování [25]

Leuders et al. [30] ve své práci zkoumá odolnost titanové slitiny Ti6Al4V proti šíření trhliny v cyklickém zatěžování. Tento parametr se využívá při výpočtech životnosti dílů, u kterých je detekována trhlina. Trhlina se v počátcích šíří lineárně a lze předvídat její chování. Jednotlivé testy proběhly u referenčního materiálu a na vzorcích výrobních technologií SLM, u kterých byl navíc zkoumán vliv tepelného zpracování. Použité tepelné zpracování uvádí Tab. 2-6 a výsledky zkoušek zobrazuje Obr. 2-19, kde lze vyčíst výrazné zlepšení únavových vlastností po tepelném zpracování.

Tab. 2-6 Tepelné zpracování jednotlivých vzorků [30]

Typ vzorku	As-built	800 °C	1050 °C	HIP
Teplota [°C]	-	800	1 050	920 (1 000 bar)
Doba [h]	-	2	2	11,9
Ochranná atmosféra	-	Argon	Vakuum	Argon

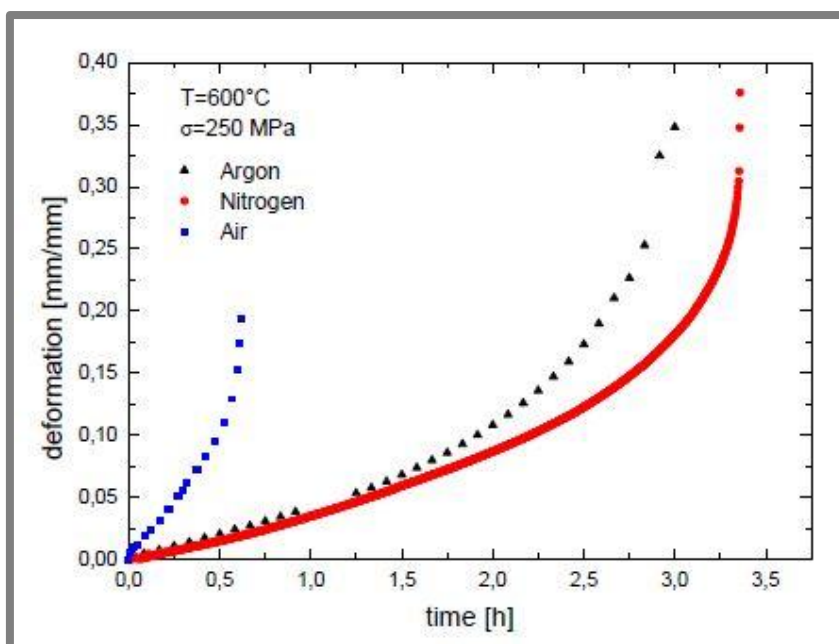


Obr. 2-19 Studium růstu trhliny u Ti6Al4V [30]

2.3.4 Oxidace Ti6Al4V za vyšších teplot

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, při vysoké teplotě může dojít k oxidaci slitiny titanu s okolní atmosférou. Z toho důvodu se při tepelném zpracování používá zpravidla inertní atmosféra např. argon, nebo dusík. Závislost oxidační vrstvy na čase zkoumá **Sefer [31]**. K analýze použil komerčně dostupnou titanovou slitinu Ti6Al4V, ze které byly vytvořeny vzorky o rozměrech 10 x 5 x 10 mm. Vzorky byly vyleštěny a chemicky očištěny. Připravené vzorky byly poté po dobu 500 hodin ohřívány při teplotě 500, 593 a 700 °C. Po vychlazení na vzduchu byla pomocí elektronového mikroskopu měřena tloušťka vrstvy TiO₂, kde hodnoty u jednotlivých měření dosahovaly 6,5, 32 a 198 μm.

Jak oxidace ovlivňuje mechanické vlastnosti zkoumali autoři **Reis et al. [32]**. Jejich práce spočívá ve studiu creepového chování při konstantní teplotě a zatížení. Titanové vzorky byly leštěny a zatíženy tlakem 250 MPa při teplotě 600 °C po dobu 24 hodin. Poté byla určena závislost tečení na použití okolní atmosféry čímž byl argon, dusík nebo vzduch. U vzorků, které byly zpracovány v ochranné atmosféře byla mikrostruktura velmi podobná jako u tepelně neovlivněných vzorků. K vysoké reaktivitě docházelo u vzorků umístěných na vzduchu, na kterých vznikl film TiO₂ tloušťky 0,81 μm. Výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 2-20. Z naměřených hodnot plyne, že při působení vysoké teploty za přítomnosti okolního vzduchu lze očekávat výrazné snížení modulu pružnosti. Při použití ochranného plynu jako je např. argon, nebo dusík není tento jev tak výrazný.



Obr. 2-20 Creepové křivky v závislosti na druhu atmosféry [32]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Z kapitoly 2.1 vychází dosavadní řešení úst'ových zařízení jejichž tvar se liší podle primární funkce, pro kterou jsou navrženy. Z dosavadních řešení lze vyvodit, že se jedná o tenkostěnné díly, a proto je vhodné optimalizovat výrobu převážně tenkostěnných dílů.

V kapitole 2.1.2 jsou uvedeny příklady výplní válcových těles, které mohou být použity při návrhu úst'ových zařízení vyrobených pomocí technologie SLM. Tyto struktury mají velkou výhodu v odlehčení konstrukce, případně dokážou zajistit chlazení součástí. Dále je možné tyto struktury použít i pro samotnou funkci úst'ového zařízení. Jestliže by prachové plyny proudily přes tyto struktury, jejich rychlost i energie by se snižovala, což by mělo za následek snížení hluku i světelného záblesku. Z těchto důvodů je vhodné se studiem výrobních procesů pro odlehčené struktury dále zabývat. Další charakteristikou těchto struktur může být pevnost v tlaku, kterou je možné určit experimentálně nebo MKP výpočtem.

Před samotným testováním mechanických vlastností je nutné zajistit výrobu plnoobjemových dílů na základě optimalizace procesních parametrů. Z tohoto důvodu budou prvotní testy navrženy na odhalení optimální oblasti nastavení parametrů, která zajistí minimální výskyt pórů. Při návrhu výrobního procesu je také vhodné zajistit jeho efektivitu, např. použitím vyšších rychlostí čímž lze zkrátit výrobní čas.

V kapitole 2.3.3 bylo nastíněno tepelné ovlivnění titanové slitiny při výrobě, které lze využít pro zlepšení některých mechanických vlastností např. pro zvýšení meze únavy.

Tato práce vznikla ve spolupráci s diplomovou prací **F. Rušara [33]** který se věnoval konstrukčnímu návrhu úst'ového zařízení. Cílem této práce je na základě koncepčních variant odvodit reprezentativní tvary vzorků, na které nalézt vhodnou výrobní strategii zajišťující minimální porositu. Jakmile bude známa vhodná výrobní strategie, bude přistoupeno k testování mechanických vlastností.

Cíle práce

Hlavním cílem práce je nalezení optimálních výrobních procesů pro výrobu úst'ových zařízení z titanové slitiny Ti6Al4V. Při optimalizaci je kladen důraz na nízkou porositu a dobré mechanické vlastnosti srovnatelné s dostupnými materiály.

Dílčí cíle diplomové práce

- ověření navržených výrobních strategií
- studium mechanických vlastností slitiny Ti6Al4V zpracované technologií SLM
- navržení vhodných testovacích těles a metod testování
- stanovení chování materiálu při statickém a dynamickém zatěžování

4 MATERIÁL A METODY

4

4.1

4.1 Použité zařízení

K výrobě vzorků i finálního ústředního zařízení bylo použito zařízení SLM 280^{HL} od společnosti SLM Solutions GmbH. Parametry zařízení názorně ukazuje Tab. 4-1. Pro úsporu použitého prášku byla použita stavěcí deska o rozměrech 100x100 mm, která byla vyhřívána na 200 °C. Před každou stavbou byla stavební komora vyčištěna pro zabránění kontaminací jiným druhem materiálu. Kvůli eliminaci reaktivity titanu se vzduchem byl během výrobního procesu použit argon jako ochranný plyn. Vysoká reaktivita také vedla k velmi opatrné manipulaci s titanovým práškem, kdy uzávěry láhví bylo možné otevřít pouze tehdy, až byla stavební komora zaplavena ochranným plynem. Otevření komory bylo možné pouze poté, co byl veškerý nespotřebovaný prášek zpět v uzavřených láhvích.

Tab. 4-1 Základní parametry stroje SLM 280^{HL} [34]

Stavební prostor (D x V x Š)	280x280x365 mm ³
Rychlost stavby	do 55 cm ³ /h
Tloušťka vrstvy	20–75 μm
Průměr paprsku laseru	80–115 μm
Maximální skenovací rychlost	10 m/s
Průměrná spotřeba inertního plynu při stavbě (Argon)	2,5 l/min
Maximální výkon laseru	400 W
Vnější rozměry (D x V x Š)	1 800x1 900x1 000 mm ³

Výrobní data byla vytvořena v softwaru Magics, do kterého byl importován 3D model ve formátu STL. Zde byl díl rozdělen na vrstvy, na které byla aplikována zvolená skenovací strategie. Skenovací strategie byla předmětem studie, kde bylo snahou snížit porositu.

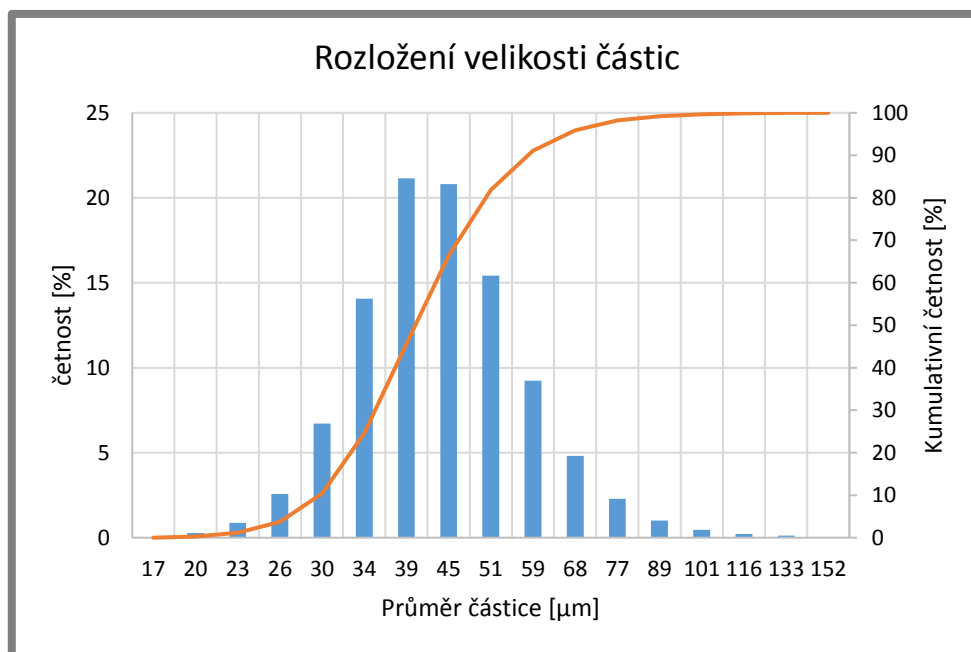
4.1.1 Použitý materiál

4.1.1

Pro výrobu testovacích vzorků byl využit již použitý a přesátý titanový prášek s označením Ti6Al4V. Přesátí prášku proběhlo na zařízení PSM 100, kterým byly z prášku odstraněny větší shluky již spáleného materiálu. Pro určení správné tloušťky vrstvy bylo provedeno měření rozložení velikosti částic. Měření proběhlo na zařízení Horiba LA 950, které k měření velikosti využívá principu laserové difrakce. Výsledek měření byl rozřazen do několika velikostních tříd, ze kterých byl poté vykreslen graf četnosti a kumulativní četnosti viz Graf 4-1. Hodnoty z měření vystihuje Tab. 4-2, na základě, kterých byla zvolena tloušťka vrstvy 50 μm. Z distribuce prášku lze vyčíst, že 90 % částic je menší než 58 μm, z čehož lze předvídat množství prášku, který bude odstraněn ze stavěcího prostoru. Je nutné, aby střední i průměrná hodnota byla menší než zvolená tloušťka, což je při použití tohoto prášku zaručeno.

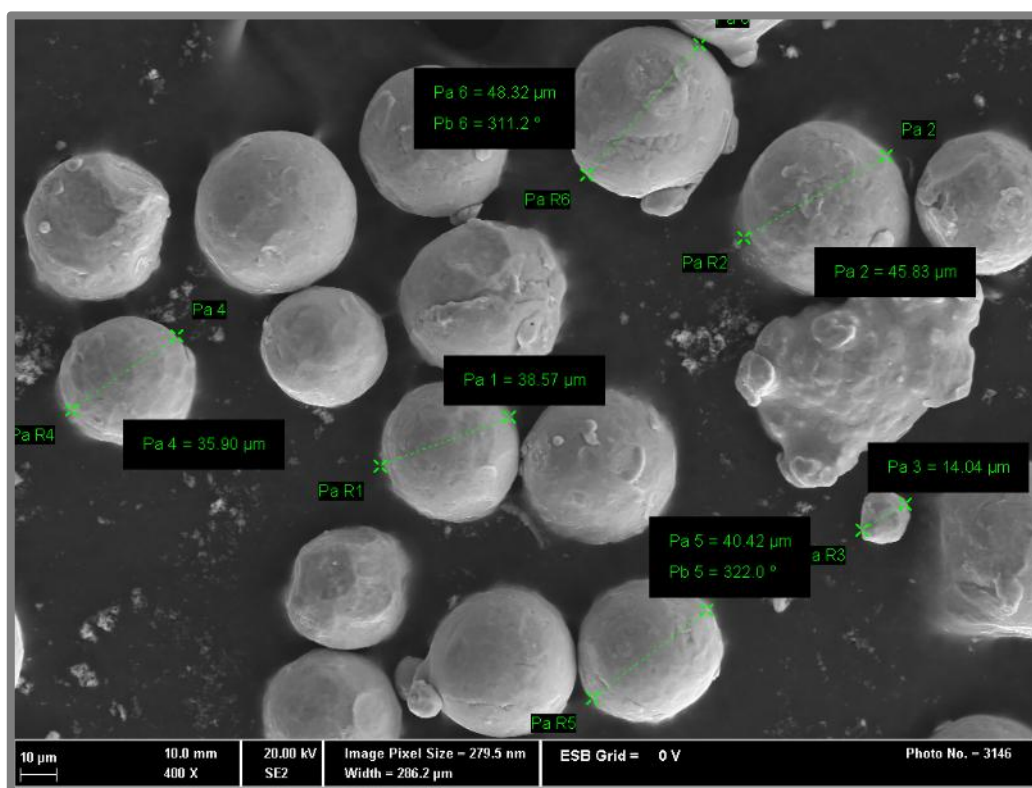
Tab. 4-2 Výsledky z měření velikosti částic

Medián [μm]	Průměr [μm]	Odchylka [μm]	D ₁₀ [μm]	D ₉₀ [μm]
40,37	42,58	12,55	29,65	58,02



Graf 4-1 Rozložení velikosti částic prášku

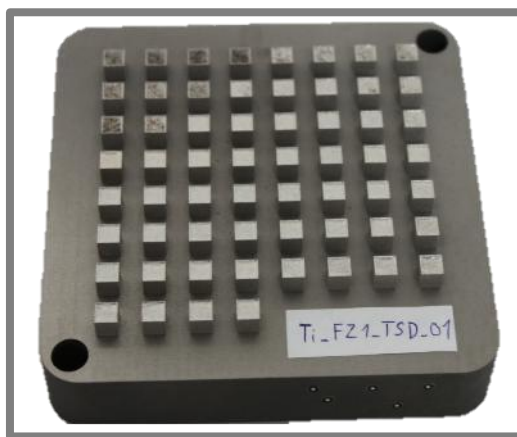
Pro zjištění tvaru částic, byl využit elektronový mikroskop. Jak lze vidět na Obr. 4-1 je převážná většina částic kulového tvaru, který je vhodný pro zpracování technologií SLM. Další fotografie prášku jsou uvedeny v příloze.



Obr. 4-1 Tvary částic použitého prášku

4.2 Optimalizace SLM procesu

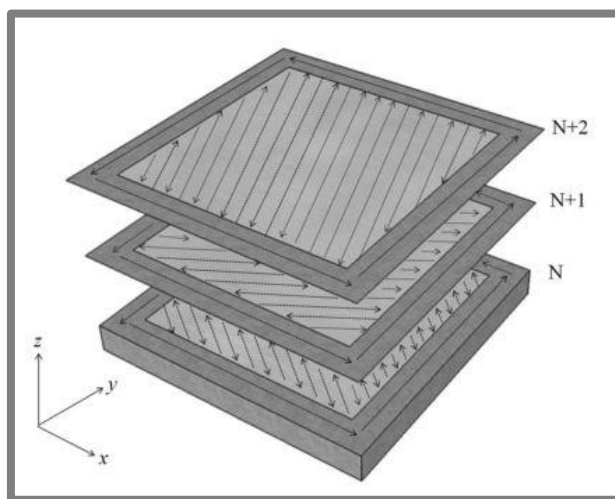
Při optimalizaci výrobního procesu nového materiálu se zpravidla začíná studiem lini-ových návarů, na kterých se zkoumá hloubka a tvar návaru. Tato fáze testování byla přeskočena, jelikož se v minulosti na ústavu konstruování ze slitiny Ti6Al4V některé díly již vyráběly. Spolu s dodávaným práškem byly obdrženy také základní kombinace výrobních nastavení, ale nebyla známa jejich vhodnost pro výrobu tenkostěnných dílů, čemuž je věnována tato práce. Pro vyhodnocení porosity byly vyrobeny krychlové vzorky o délce hrany 5 mm. Na celkem 60 vzorcích (Obr. 4-2) byla měněna skenovací rychlost (50-1300 mm/s) spolu s výkonem laseru (40-400 W). Odsazení sousedních drah laseru bylo nastaveno na hodnotu 120 μm , které bylo u všech vzorků konstantní. Jakmile byly známy perspektivní oblasti výrobního procesu, byly použity na výrobu tenkostěnných vzorků, u kterých byla opět zkoumána porosita a výrobní přesnost viz kapitola 4.3.



Obr. 4-2 Vzorky 5x5x5 mm³

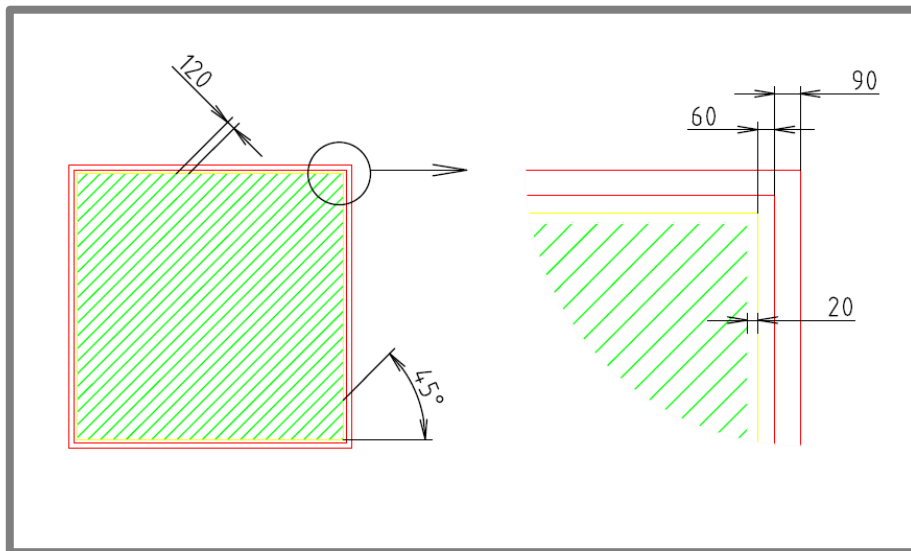
4.2.1 Skenovací strategie

U vzorků 5x5x5 mm byla použita skenovací strategie zobrazená na Obr. 4-3. U této strategie laser postupně šrafuje v rovnoběžných dráhách celý průřez vzorku a v další vrstvě jsou pak jednotlivé dráhy pootočený o 90 °.



Obr. 4-3 Zvolená skenovací strategie [39]

Kontura u všech vzorků je tvořena dvěma dráhami s vyšším a jednou dráhou s nižším výkonem laseru ($P=100\text{ W}$, $v=350\text{ mm/s}$ a $P=150\text{ W}$, $v=450\text{ mm/s}$) Jednotlivé vzdálenosti ukazuje Obr. 4-4.



Obr. 4-4 Skenovací strategie (kontura červeně, fill kontura žlutě, rozměry v μm)

4.2.2 Měření porosity

K určení porosity byly využity dva způsoby. Pro porovnávací způsoby byla zvolena obrazová metoda, kde byly vzorky vybroušeny a vyleštěny na metalografické brusce. Tato plocha byla pomocí světelného mikroskopu nafocena a vyhodnocena pomocí softwaru ImageJ. Pro přesnější analýzu porosity byla zvolena technologie počítačové tomografie, kde lze měřit porositu v celém objemu vzorku. Touto metodou byl analyzován vzorek, který při obrazové metodě dosahoval nejlepších výsledků.

ImageJ

Po převedení obrazu do 8 bitového byla použita funkce „Threshold“, která na základě odstínu šedi vybere světlé oblasti (vhodným nastavením světla u pořizování snímků ploch mají póry světlou barvu). Tímto postupem bylo provedeno měření porosity u všech měřených vzorků.

Počítačová tomografie

Princip této metody spočívá v tom, že přes vzorek prochází rentgenové záření, které je zachyceno detektorem. Rozdílná hustota uvnitř zkoumaného vzorku má za následek změnu průchodnosti paprsku, který je snímán detektorem. Výsledkem je vykreslení jednotlivých vrstev vzorku, kde lze vidět jednotlivé změny hustoty. Takto lze zvýraznit a poté změřit póry uvnitř objemu. Pro analýzu byl použit přístroj GE v|tome|x L 240 dostupný na fakultě strojního inženýrství VUT.

4.3 Přesnost výroby

Jelikož při stavbě dílů mohou vznikat odchylky tvaru, bude předmětem výzkumu i velikost těchto odchylek. K tomuto testu bylo využito zařízení ATOS III Triple Scan, které umožňuje naskenovat reálný objekt a převést jej do digitální podoby. Takto naskenovaný objekt je možné porovnat s původním CAD modelem. Princip skenování spočívá v promítnutí světelných pruhů na objekt, které jsou pomocí CCD čipu snímány. Výstupem je síť bodů v prostoru, ze kterého je utvořen uzavřený 3D model [35], jeho přesnost závisí na zvolené optice zařízení. U testování odchylek výroby byla použita optika s označením 170, parametry nastavení skenování uvádí Tab. 4-3.

Tab. 4-3 Parametry skenování

Skenovaný objem	170x130x130 mm ³
Vzdálenost dvou měřitelných bodů	0,055 mm
Měřitelná vzdálenost	430 mm

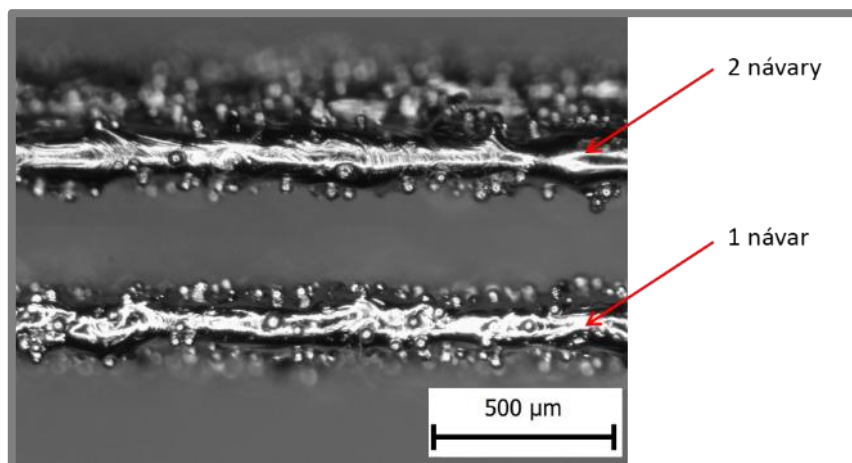
4.3.1 Tvar vzorků pro stanovení přesnosti

Z rešerše vychází tvar ústového zařízení. Tento tvar je převážně kruhového průřezu s kombinací tenkostěnných přepážek. Z toho důvodu je tvar vzorků přizpůsobený těmto parametrům. Jako kruhové vzorky jsou zvoleny mezikruží s vnějším průměrem 10 mm a stěnou tloušťky 2, 1,5 a 1 mm. Pro studium tloušťky stěn bylo navrženo 6 tenkostěnných vzorků od 0,5 do 3 mm a délka stěn byla zvolena 10 mm. Na těchto vzorcích byla dále zkoumána porosita. Rozložení vzorků na desce ukazuje Obr. 4-5, skenovací strategie byla odvozena na základě výsledků z krychlových vzorků. Po zhodnocení nejvýhodnější strategie byla vyrobena další série vzorků tloušťky 0,5 a 1,5. Na těchto vzorcích byla optimalizována výrobní strategie pro odstranění pórů vyskytujících se na okrajích vzorků.



Obr. 4-5 Rozložení vzorků na stavěcí desce

Dalším testem pro zjištění výrobní přesnosti, byla výroba tenkostěnných dílů o minimální tloušťce. Tyto díly vznikly vrstvením jedním, resp. dvěma návary na sebe, díky čemuž bylo dosaženo nejmenší možné tloušťky. Tyto díly zobrazuje Obr. 4-6. Výsledná tloušťka byla hodnocena pomocí 3D skenu.



Obr. 4-6 Tenkostěnné díly nejmenší možné tloušťky

4.3.2 Studium povrchu

Další parametr, který může být důležitý při návrhu úst'ového zařízení, je drsnost povrchu vyráběného dílu. U vnitřních částí zařízení může být požadována vysoká drsnost, která zajistí turbulentní proudění, to vede k přeměně energie a potlačení nežádoucích jevů. Naopak u vnějších povrchů je pro lepší vzhled požadována nižší drsnost. Ke zjištění drsnosti byl využit optický profilometr dostupný na Ústavu konstruování, který má označení Bruker ContourGT-X8. Základní možnosti skenování profilometru názorně ukazuje Tab. 4-4. Prvně byla měřena drsnost na neupravených dílech, poté byly tyto díly otryskány pomocí ručního tryskacího zařízení.

Tab. 4-4 Základní parametry optické profilometru Bruker ContourGT-X8 [36]

Zvětšení	0,5x – 200x
Rozlišení	0,1 nm
Skenovací rozsah v ose Z	0,1 nm – 10 mm
Skenovací rychlost	92,5 μm/s

4.4 Zjištění mechanických vlastností

Po optimalizaci výrobních parametrů zajišťujících minimální porositu byly vyrobeny vzorky pro testování mechanických vlastností. Vzhledem k odstranění vlivu struktury povrchu, nebo vlivu nepřesnosti výroby byly vzorky obrobena na požadovaný tvar příslušné zkoušky třískovým obráběním.

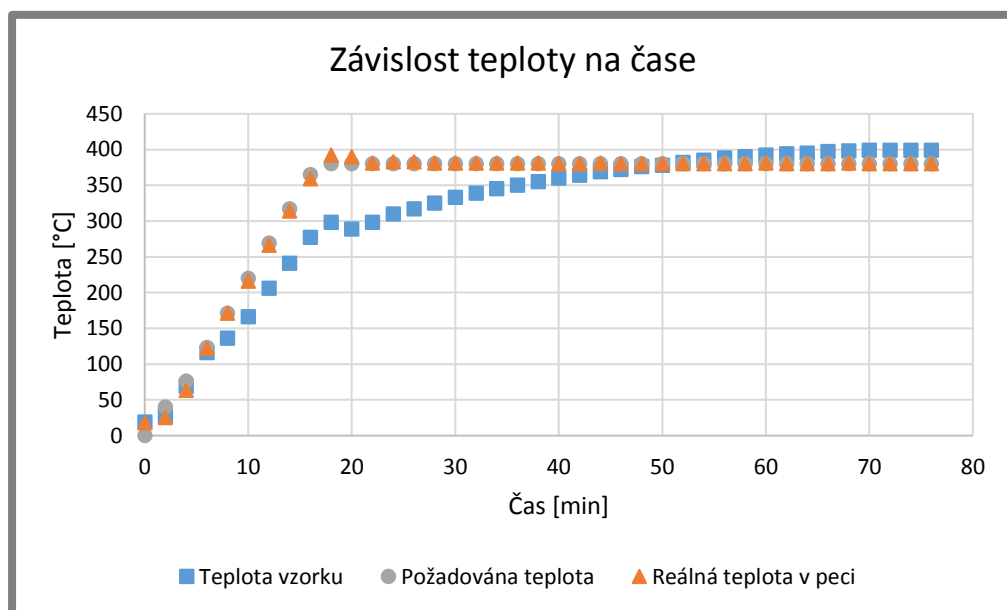
4.4.1 Tepelné zpracování

Z přehledu současného stavu vyplývá že, díly vyrobené technologií SLM vykazují vysoké pevnostní charakteristiky jako je tvrdost, nebo mez pevnosti. Naproti tomu lze očekávat nízkou tažnost, což při porušení vede ke křehkým lomům. V této práci byly ověřeny dva způsoby tepelného zpracování s označením T1 a T2, které je s výjimkou testování únavy použito na všechny mechanické testy, aby byl lépe viditelný vliv na materiálové vlastnosti. Pro snížení zbytkového napětí bylo použito tepelné zpracování s označením T1 při 380 °C podle [28], kterým jsou minimálně ovlivněny výsledné mechanické vlastnosti. Výdrž na teplotě byla navýšena na 8,5 h, z důvodu zpoždění ohřevu dílu umístěného v peci. Pro přesné stanovení byl proveden experiment, kde byla měřena teplota na povrchu vzorku umístěného v peci a porovnávána s teplotou uvnitř pece viz Graf 4-2. Z výsledků je patrné zpoždění prohřátí dílu okolo 30 min, a proto je o tuto hodnotu doba výdrže navýšena. Dále je možné pozorovat, že hodnota teploty je přibližně o 20 °C vyšší než požadovaná, která má ale minimální vliv na změnu mechanických vlastností. Toto tepelné zpracování bylo také využito proto, že při výrobě větších dílů docházelo k prohnutí stavěcí platformy. Tepelným zpracováním došlo ke srovnání a bylo tak možné odřezání dílů z platformy.

Tepelné zpracování T2 vychází ze studií autorů Vrancken [25] a Leuders [30], kterým je možné zvýšit tažnost a snížit křehké chování. Jelikož z rešerše vychází vhodnost tohoto tepelného zpracování pro únavové vlastnosti, bylo použito pro zvýšení meze únavy při testování vysokocyklové únavy. Přesné hodnoty použitých tepelných zpracování shrnuje Tab. 4-5.

Tab. 4-5 Použité tepelné zpracování

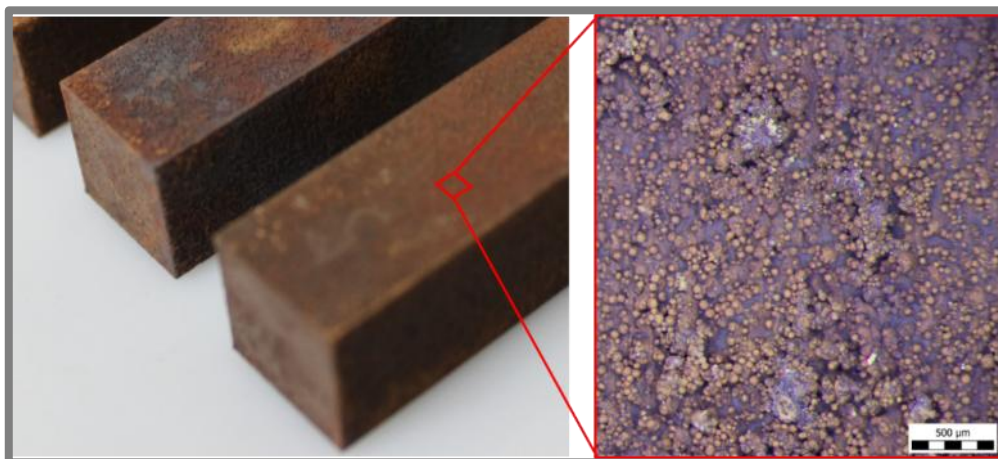
Označení	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [h]	Ochlazení
T1	380	8,5	v peci
T2	850	2	v peci



Graf 4-2 Průběh teplot v peci a na povrchu vzorku

4.4.2 Oxidace vzorků

Jelikož vzorky pro mechanické testování prošly v průběhu tepelného zpracování různě vysokými teplotami za přítomnosti okolního vzduchu, bylo možné pozorovat odlišnou oxidaci povrchu vzorků. Příklad zoxidovaného povrchu vzorku při 850 °C lze vidět na Obr. 4-7. Oxidační vrstva byla odstraněna otryskáním, nebo obrobením. U teploty 380 °C, docházelo pouze ke zlatavému obarvení povrchu.



Obr. 4-7 Oxidační vrstva titanových vzorků vzniklá při 850 °C

4.4.3 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na ústavu materiálových věd a inženýrství na VUT za pomoci trhacího stroje Zwick Z250, která odpovídá normě ČSN EN ISO 6892-1. Tento stroj umožní zatížení až 250 kN, což společně s předpokládanou mezí pevností určuje maximální průměr vzorku. Z kapitoly 2.3 vyplývá předpokládaná mez pevnosti a její hodnota je použita pro návrh testovacího tělesa. Rozměry zkušební tyče odpovídají normě DIN 50125 a její výkres je uveden v příloze. U tepelného zpracování T1 byly vyrobeny 4 horizontální vzorky pro statistickou analýzu. Pro porovnání tepelných zpracování byl vyroben vertikální vzorek, který byl tepelně zpracován podle hodnot T2.

Aby nebyla překročena maximální síla stroje, bylo nutné provést návrh rozměrů vzorků, který je určen předpokládanou mezí pevnosti a maximální silou stroje. Maximální průměr vzorku se vypočte podle vzorce:

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{max}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{F_{max}}{R_m}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{250 \text{ kN}}{1400 \text{ MPa}}}{\pi}} = 15 \text{ mm}$$

kde:

R_m	[MPa]	-mez pevnosti
S_{max}	[mm ²]	-maximální plocha vzorku
F_{max}	[N]	-maximální síla stroje

4.4.4 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena Charpyho kladivem a spočívá ve zjištění energie potřebné k porušení vzorku. Zkušební metoda nese označení ČSN ISO 148-1, která dovoluje volitelný třetí rozměr vzorku. V této práci byla tloušťka vzorku zvolena 7,5 mm, která lépe vystihuje chování tenkostěnných dílů. Použitý výkres vzorku je uveden v příloze. V první sadě testovaných vzorků byl zkoumán vliv orientace stavby (horizontální a vertikální) a rozmístění těchto vzorků na platformě lze vidět na Obr. 4-8. Na tyto vzorky bylo použito tepelné zpracování T1. Ve druhé sadě byly vyrobeny pouze horizontální vzorky a tepelně zpracovány podle T2, čímž se předpokládá zvýšení vrubové houževnatosti. Výsledkem zkoušky je nárazová práce K [J], která se dále přepočítá na vrubovou houževnatost KC podle vzorce [37]:

$$KC = K/S_0 [J \cdot cm^{-2}]$$

kde:

KC	[J·cm ⁻²]	-vrubová houževnatost
K	[J]	-nárazová práce
S_0	[cm ²]	-plocha příčného průřezu zkušební tyče v místě vrubu



Obr. 4-8 Rozmístění vzorků v první sadě

4.4.5 Zkouška tvrdosti

K měření tvrdosti byl využit ruční odrazový tvrdoměr s označením TH-1100. Tvrdost byla měřena na vzorcích z tahové a únavové zkoušky, které byly před každým testem vybroušeny. Vzorky, u kterých nebylo použito žádné tepelné zpracování byly ve výsledcích označeny jako „As-built“.

4.4.6 Únavová zkouška

Únavová zkouška umožňuje zjištění chování materiálu při cyklickém zatěžování. V této práci byla zkoumána vysokocyklová únav pro zjištění meze únavy. K testování bylo použito 9 vzorků, které byly při stavbě orientovány vertikálně tyto vzorky lze vidět na Obr. 4-9. Po odřezání z výrobní platformy byly vzorky tepelně zpracovány

podle T2. Zkouška byla provedena na zařízení dostupném na Ústavu konstruování zařízením RUMUL Cracktronic 8204, který pracuje v ohybovém režimu. Zatěžování probíhalo podle symetrického cyklu (parametr asymetrie $R=-1$). U vybraných vzorků byla provedena analýza lomové plochy pomocí elektronového mikroskopu. Tvar vzorků pro únavovou zkoušku je normalizovaný a výkres je zobrazen v příloze.



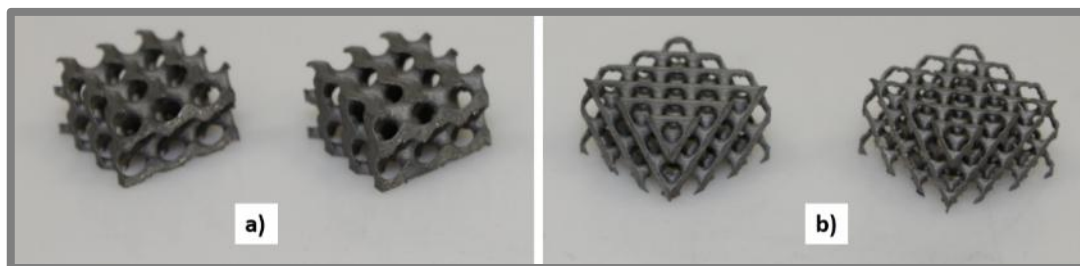
Obr. 4-9 Umístění únavových vzorků na platformě

4.5 Metalografická analýza

Pro metalografickou analýzu byly vybrány vzorky s tepelným zpracováním T1 i T2, aby byly vidět jednotlivé strukturální změny. Vzorky byly odřezány ve směru kolmém na směr stavby a poté co byly vyleštěny do zrcadlového lesku byly naleptány pro pozorování jednotlivých mikrostruktur. K pozorování byl využit světelný mikroskop s 500násobným zvětšením.

4.6 Studium 3D struktur

Pro analýzu 3D struktur bylo vyrobeno několik vzorků, na kterých se hodnotila jejich tvarová přesnost, porosita a mechanické vlastnosti. Pro analýzu tvaru byly použity dva typy struktur (gyroid a diamond) s rozdílnými objemovými podíly viz Obr. 4-10. Objemový díl je určen parametrem t , který určuje poměr mezi objemem dílu a prázdným prostorem. Při parametru $t=0$ je vzorek z 50 % vyplněn materiálem. Velkou výhodou těchto struktur je, že jsou samonosné a lze je tak technologií SLM vyrobit bez použití podpůrných struktur [9]. Z důvodu tvarové složitosti, byly struktury hodnoceny pouze vizuálně po ručním otryskání. U struktur typu diamond byla po vyleštění na metalografické brusce zkoumána porosita. Řez vzorkem byl veden pod úhlem 45° , pro zachování co největší plochy průřezu.

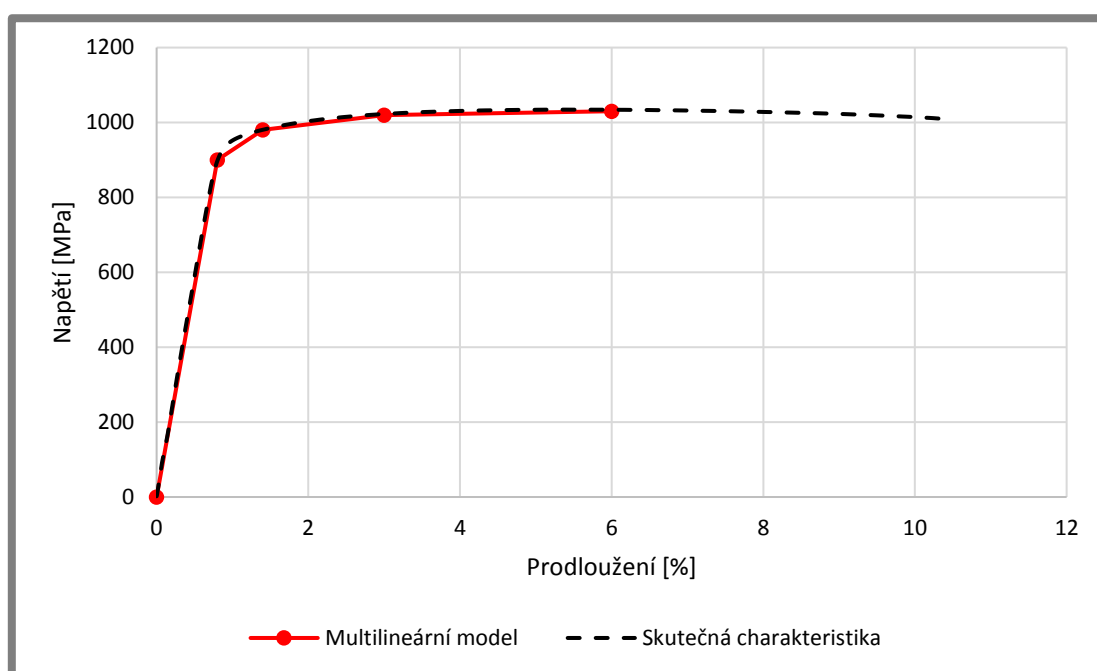


Obr. 4-10 Struktury použité pro analýzu tvaru (a) struktury typu gyroid, b) struktury typu diamond)

4.6.1 Pevnost struktur v tlaku

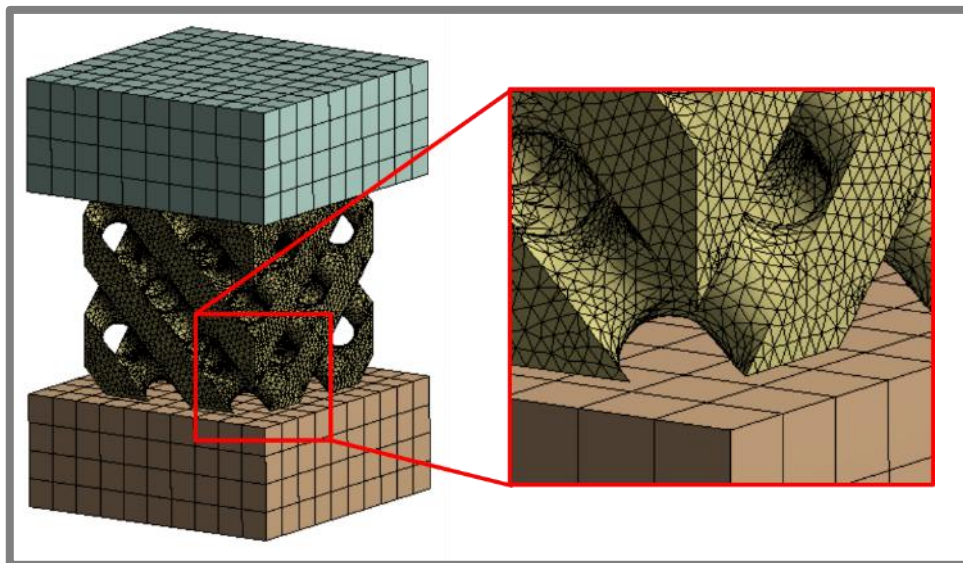
4.6.1

Pro zjištění mechanických vlastností byly vyrobeny dvě struktury pro jednotlivé tepelné zpracování T1 a T2. Objemový podíl byl zvolen 50 % a velikost jedné buňky 9 mm. Před samotnou zkouškou byly vzorky otryskány kvůli odstranění oxidační vrstvy. Aby bylo možné predikovat potřebné zatížení k porušení struktur byla provedena MKP simulace zkoušky. Ve výpočtu byl použit multilineární model materiálu struktury, který zahrnoval deformační zpevnění. Hodnoty materiálového modelu byly získány tak, že spojitá křivka z tahové zkoušky byla nahrazena lomenou čarou. Charakteristiku použitého modelu materiálu ukazuje Graf 4-3.



Graf 4-3 Multilineární model materiálu

Výpočet byl proveden v prostředí ANSYS Workbench a konečně prvkovou síť ukazuje Obr. 4-11. Zatížení bylo realizováno pomocí posuvu horní podstavy ve tvaru kváдру, dolní podstava byla pevně ukotvená a vazby mezi podstavami a strukturou byly nastaveny jako pevně spojené. Materiál podstav byl zvolen lineární, ale byla použita vysoká hodnota modulu pružnosti, aby nebyly ovlivněny výsledky. Podíl reakční síly, která byla výsledkem simulace, a vnějšího příčného průřezu bylo získáno napětí v závislosti na stlačení. Tím byly zjištěny teoretické mechanické vlastnosti struktury, které je možné dále využít při pevnostních výpočtech.



Obr. 4-11 Konečně prvková síť 3D struktury

5 VÝSLEDKY

5

5.1

5.1 Test výrobních parametrů

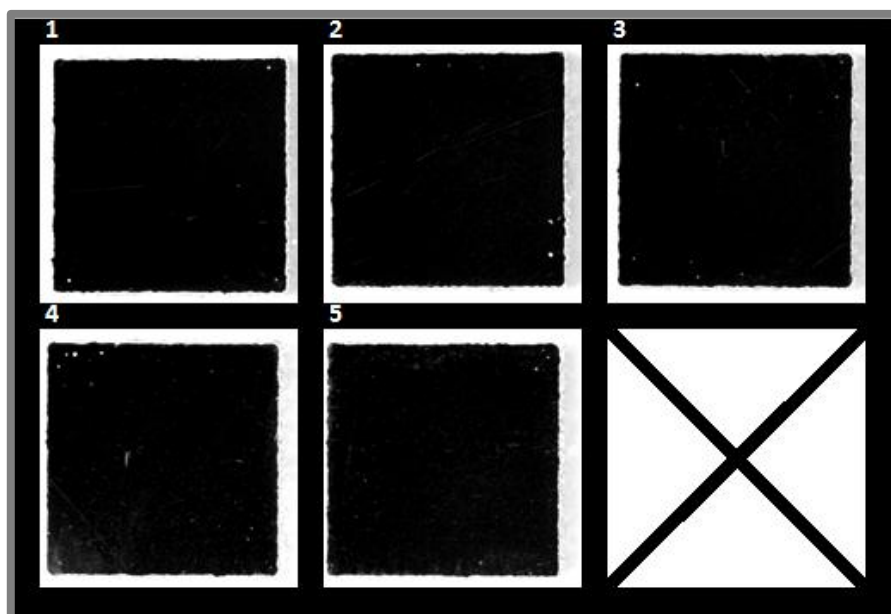
Při tomto testu byla zkoumána porosita v závislosti na volbě procesních parametrů. Použité parametry experimentu jsou podrobně popsány v kapitole 4.2. Procesní parametry jako výkon a rychlost laseru vycházely z doporučených nastavení výrobcem prášku a parametrů z rešerše. Tyto vzorky byly před broušením nafoceny z vrchní stěny, kde bylo možné vidět jednotlivé návary.

Po vybroušení a vyleštění byla zkoumána porosita, která v převážné většině vzorků dosahovala hodnot menších než 1 %. Porosita byla měřena na celé vyleštěné ploše vzorku, tudíž do ní byly zahrnuty i póry vyskytující se na rozhraní kontury a vnitřní výplně. Nutno podotknout, že výskyt těchto pórů lze dále odstranit správným nastavením kontur.

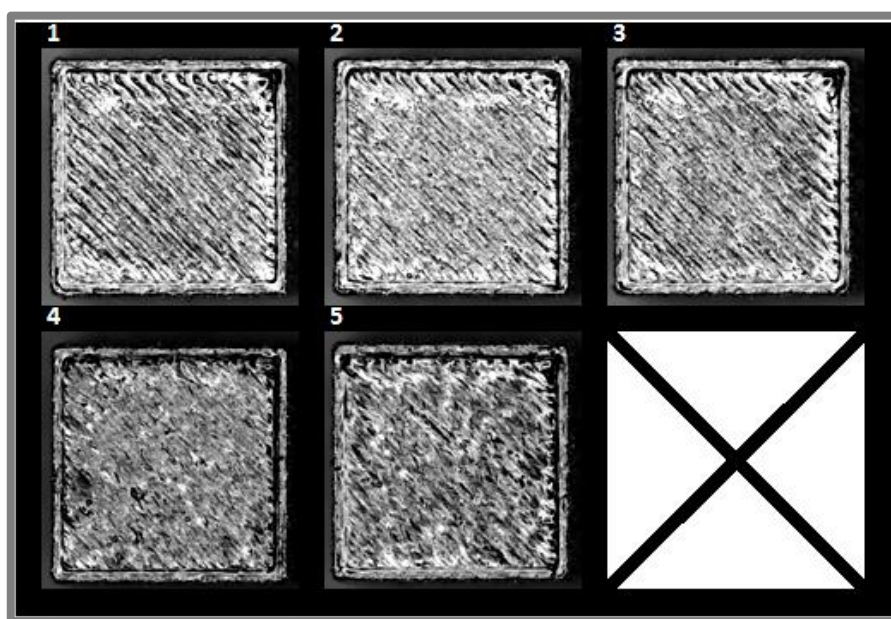
Pro další testy byly vybrány vzorky s relativní hustotou vyšší než 99,85 % a u kterých se také dbalo na výběr takové skenovací strategie, která zajišťovala rychlejší výrobu, tedy parametry s vyššími skenovacími rychlostmi. Jednotlivé kombinace výrobních parametrů a naměřené výsledky přehledně ukazuje Tab. 5-1. Tyto parametry jsou dále použity k výrobě tenkostěnných vzorků. Přehled vybraných vzorků ukazuje Obr. 5-1 a Obr. 5-2.

Tab. 5-1 Vybrané výrobní parametry

Kombinace parametrů	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mm/s]	Hustota energie [J/mm ³]	Relativní hustota [%]
1	275	900	56,94	99,93
2	225	750	50,00	99,93
3	225	658	56,99	99,93
4	125	400	52,08	99,89
5	125	200	104,17	99,94



Obr. 5-1 Přehled vybraných vzorků

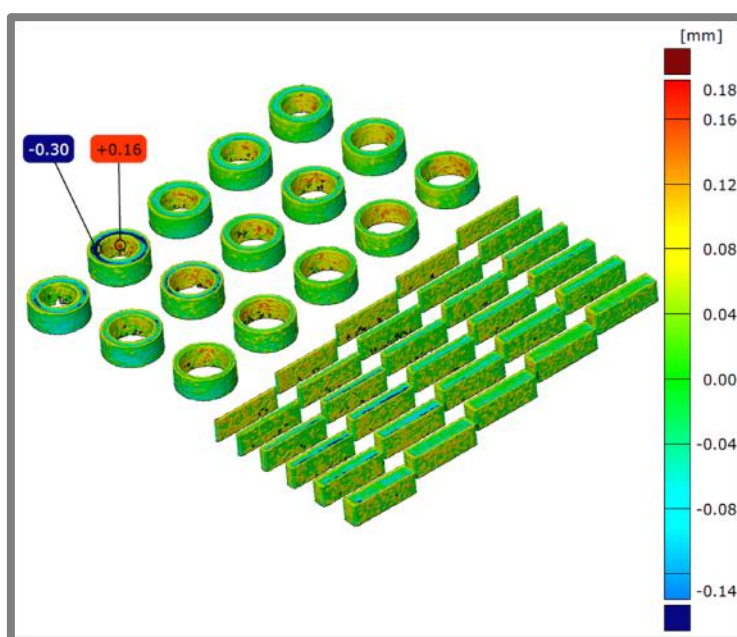


Obr. 5-2 Horní povrch vzorků

5.2 Tenkostěnné díly I

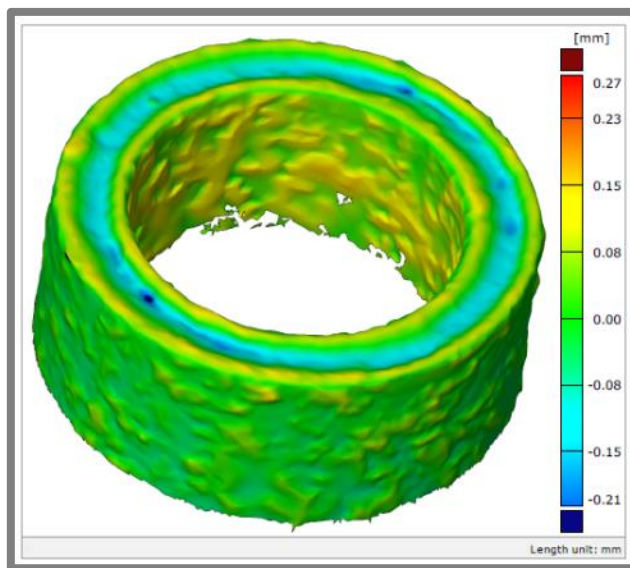
Jak bylo popsáno v kapitole 4.3, pro stanovení přesnosti výroby byl navržen test, na kterém byly zkoumány odchylky od požadovaného tvaru. Při tomto testu byla také zkoumána porosita tenkostěnných dílů a porovnána se vzorky 5x5x5. Pro skenování laserovým paprskem byla zvolena šachovnicová strategie s natočením jednotlivých polí 79 °.

Na vyrobené vzorky byl aplikován zmatňující prášek pro snadné nasnímání 3D skenerem ATOS Triple Scan. Poté byla naskenována data porovnána s CAD modelem, který reprezentoval požadovaný tvar. Vyhodnocení bylo provedeno v softwaru GOM Inspect. Ke spojení naměřených dat a CAD modelu byla využita funkce Best Fit, která spojí oba objekty s co nejmenšími odchylkami. Výsledek přesnosti tvaru vystihuje Obr. 5-3.



Obr. 5-3 Výsledek porovnání 3D a naskenovaných dat

Většina rozměrů je v toleranci $\pm 0,04$ mm. U vnějších rozměrů můžeme pozorovat větší rozměr než požadovaný, to může být způsobeno mírným natavením okolního prášku na stěnu. Tento jev také výrazně zvyšuje drsnost povrchu. Analýza povrchu je blíže popsána v kapitole 5.3. Dále je možné pozorovat „propad“ horní stěny oproti kontuře (viz Obr. 5-4). Tento jev je nazýván hranovým efektem a vzniká natavením většího množství prášku na konturu, což je následek jejího zvětšení.



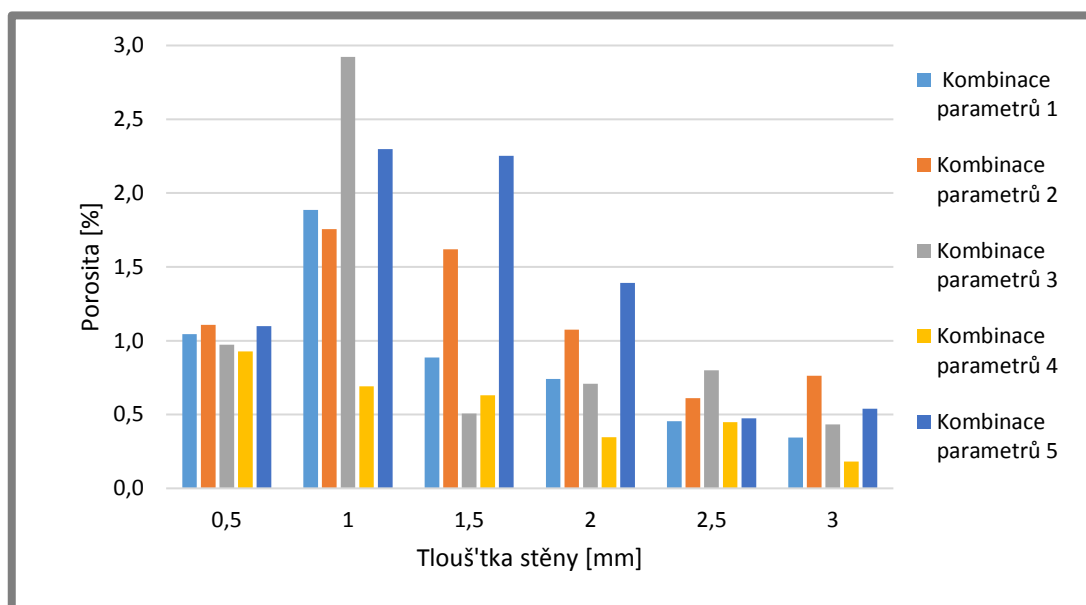
Obr. 5-4 Hranový efekt na kontuře vzorku

5.2.1 Vyhodnocení porosity

Analýza porosity tvarových těles byla rozdělena na porositu rovných a válcových stěn. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny níže.

Porosita rovných stěn

Porosita byla vyhodnocována na celé ploše vzorků. Opět tedy byly zahrnuty i póry na kontuře. Vliv porosity v závislosti na volbě výrobních parametrů vystihuje Graf 5-1.

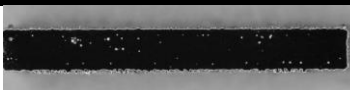
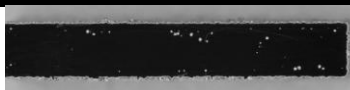


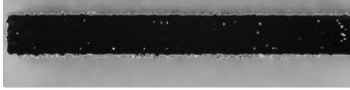
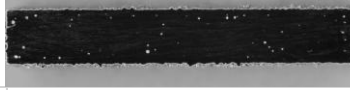


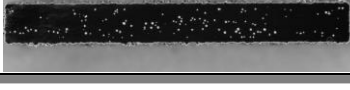
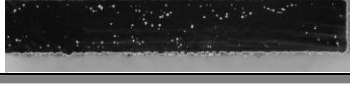


Graf 5-1 Porosita rovných stěn v závislosti na výrobních parametrech

Z grafu vyplývá, že celkově nejlepších výsledků dosahuje set nastavení s označením 4, čemuž odpovídá výkon laseru 125 W a skenovací rychlost 400 mm/s. Dosažené výsledky relativní hustoty názorně ukazuje Tab. 5-2. Zkrácený přehled vzorků s tloušťkami 1,5 a 2 mm lze vidět na Obr. 5-5. Celkový přehled vzorků je uveden v příloze.

Tab. 5-2 Dosažená relativní hustota u rovných stěn (Kombinace par. 4)

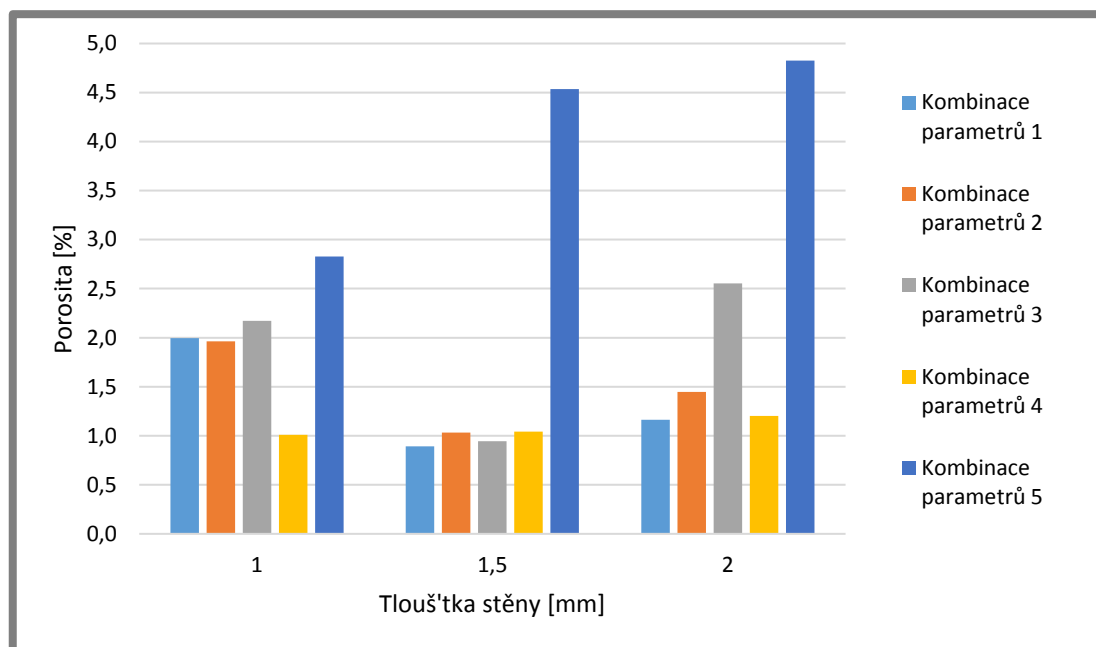
Tloušťka [mm]	Relativní hustota [%]
0,5	99,07
1	99,31
1,5	99,37
2	99,65
2,5	99,55
3	99,82

Kombinace parametrů	t=1,5 mm	t=2 mm
1		
2		
3		
4		
5		

Obr. 5-5 Přehled tenkostěnných vzorků tloušťky 1,5 a 2 mm

Porosita válcových stěn

Při vyhodnocování porosity válcových vzorků, byl oproti rovným stěnám zjištěn nárůst porosity. To může být způsobeno, buď velikostí průřezu vzorku, nebo umístěním na platformě. Vliv umístění bude vysvětlen dále. Dosažené hodnoty porosity názorně zobrazuje Graf 5-2 a přehled kruhových vzorků je uvedena v příloze.



Graf 5-2 Porosita válcových stěn v závislosti na výrobních parametrech

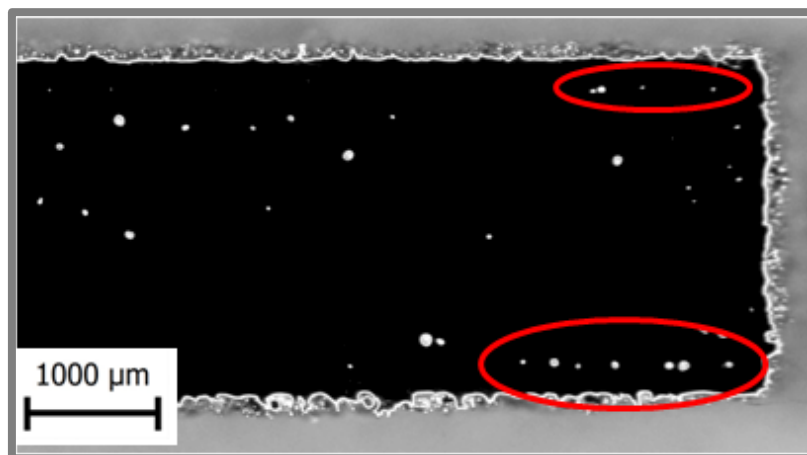
Obdobně jako u rovinných stěn dosahuje nejnižší porosity set nastavení s označením 4. Z tohoto důvodu je vhodné použití tohoto parametru k další optimalizaci. Pro snadnější orientaci je v Tab. 5-3 uvedena dosažená relativní hustota.

Tab. 5-3 Dosažená relativní hustota u válcových stěn (Kombinace par. 4)

Tloušťka [mm]	Relativní hustota [%]
1	98,80
1,5	98,96
2	98,99

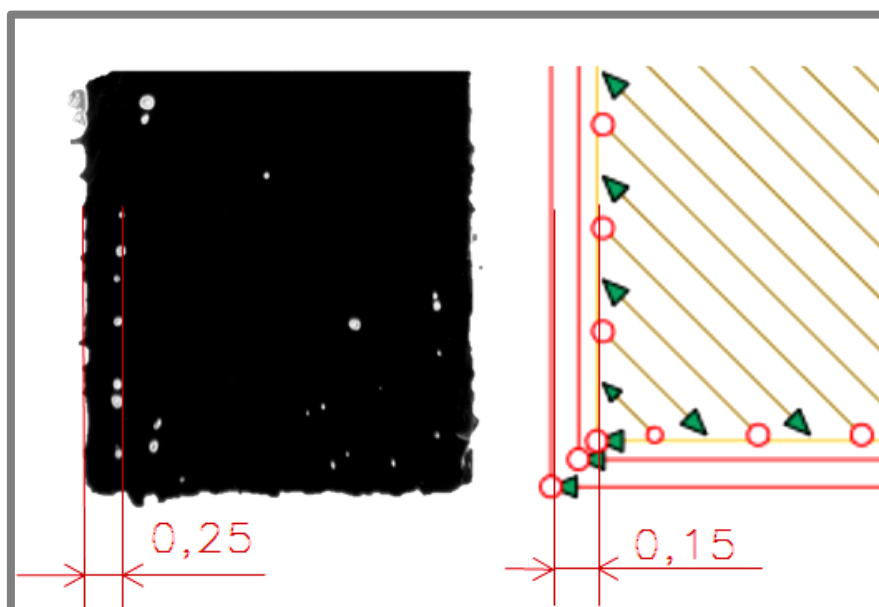
Vyhodnocení výskytu porosity

Po zhodnocení porosity lze nalézt určitý opakující se výskyt pórů. Prvním příkladem můžou být póry na krajích vzorků viz Obr. 5-6. Tento jev lze nalézt téměř u všech vzorků.



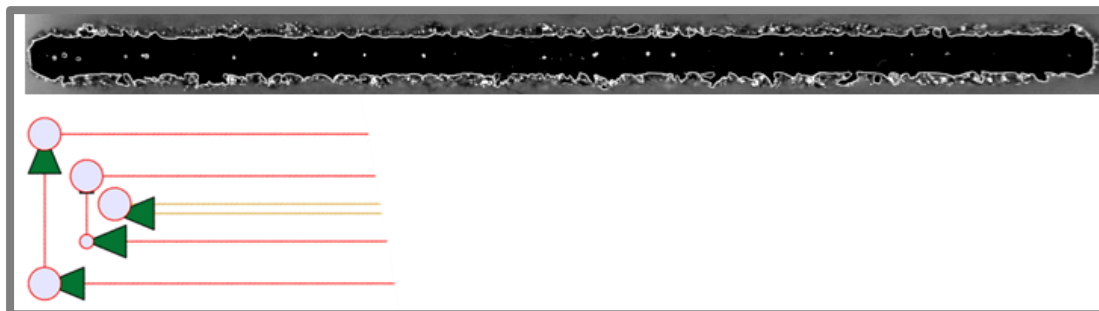
Obr. 5-6 Výskyt porosity na okrajích vzorků

Příčinou může být špatná volba odsazení jednotlivých kontur. Při testu tvaru byly použity dvě hlavní a jedna vnitřní kontura, která spojuje hlavní kontury s objemovou výplní. Pro přesné určení příčiny byla změřena vzdálenost pórů od krajů vzorku a porovnána s jednotlivými dráhami laseru. Naměřené hodnoty lze vidět na Obr. 5-7. Jelikož je návar první kontury o 0,09 mm odsazen od požadovaného tvaru (Beam Compensation), je spojení vnitřní kontury a výplně ve vzdálenosti 0,24 mm. Z toho lze usoudit, že největší vliv na výskyt těchto pórů má s největší pravděpodobností vzdálenost mezi vnitřní konturou a výplní. Tento parametr je v softwaru Magics označován jako „Hatch offset“.



Obr. 5-7 Vzdálenost výskytu porosity od kraje vzorku

Další výrazná opakovatelnost porosity se objevovala u stěn tloušťky 0,5 mm. Zde lze vidět, že se póry objevují téměř po celé délce vzorku.



Obr. 5-8 Výskyt pórů u stěn tloušťky 0,5 mm

Důvodem výskytu těchto pórů může být to, že vnitřní kontury jsou blízko sebe a dochází tak k velké koncentraci energie uprostřed stěny. Zlepšení může nastat po změně jednotlivých odsazení kontur, nebo změně výkonu laseru. Získané poznatky jsou aplikovány pro další návrhy výrobních parametrů.

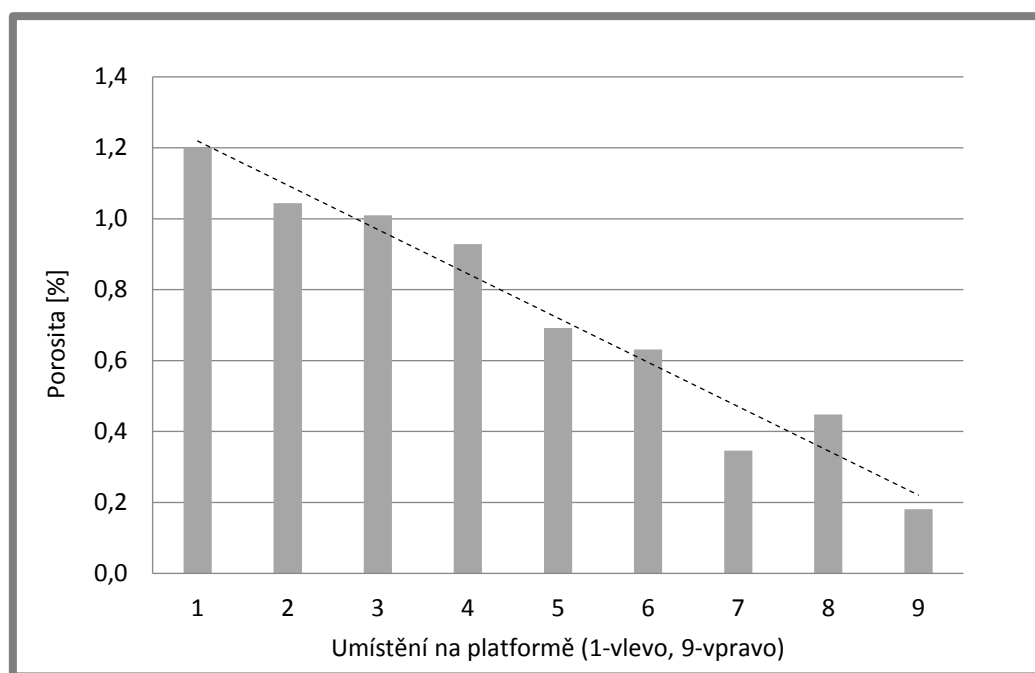
Vliv umístění na porositu

Při zkoumání porosity u testu tvaru bylo objeveno výrazné zvýšení porosity v závislosti na umístění vzorků. Ta se zvyšovala u dílů, které byly dále od ústí proudu inertního plynu (viz Obr. 5-9). Proud plynu může unášet již natavené částice prášku, které při dalším natavení zapříčiní vznik vad. Tento jev je možné odstranit vhodným umístěním dílů na platformě.



Obr. 5-9 Proud inertního plynu

Vliv umístění vystihuje Graf 5-3. Nutno podotknout, že závislost je pouze orientační, jelikož byla měřena na různých tvarech vzorků.

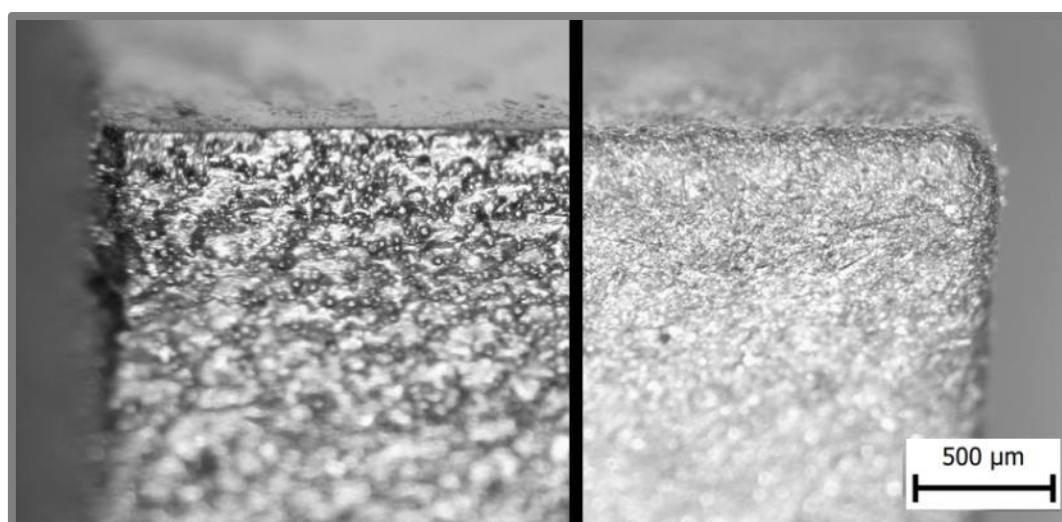


Graf 5-3 Závislost porosity na umístění (výkon laseru 125 W)

5.3 Studium povrchu

5.3

Jak již bylo zmíněno kvalita povrchu dílů vyrobených technologií SLM není příliš vysoká. U šikmých stěn je to hlavně z důvodu výskytu schodového efektu, ale zhoršený povrch lze také nalézt i u kolmých stěn. To je zapříčiněno natavením prášku k povrchu. Prášek lze relativně snadno odstranit, a to například otryskáním jak lze vidět na Obr. 5-10 a snížit tak drsnost povrchu.

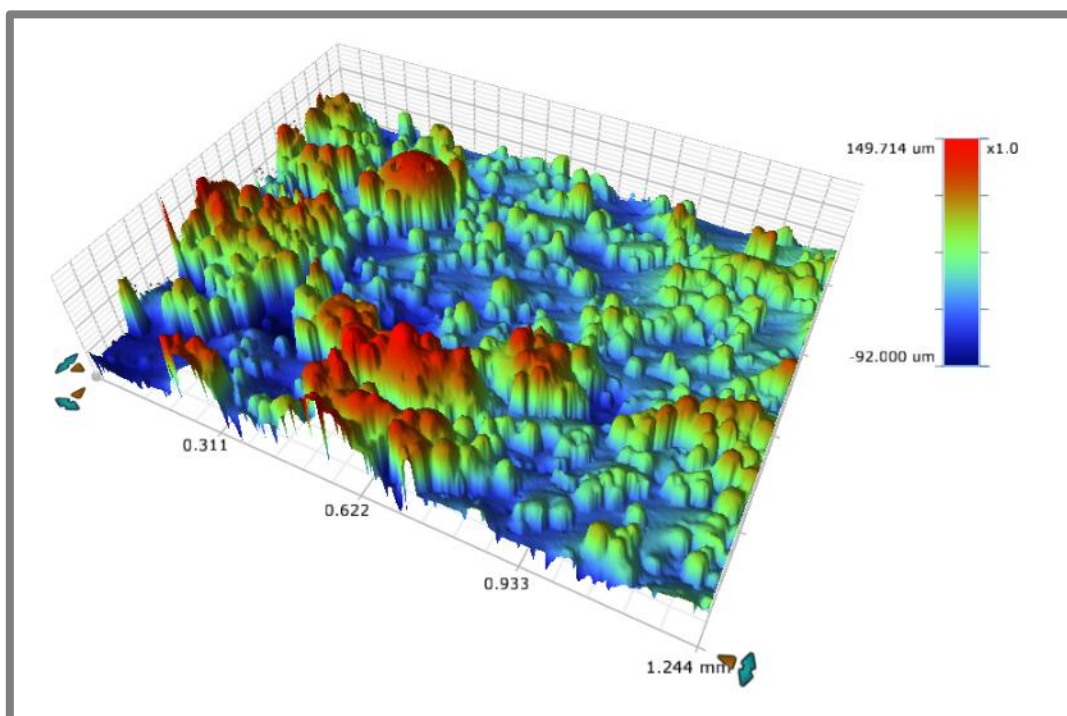


Obr. 5-10 Povrch před (vlevo) a po otryskání

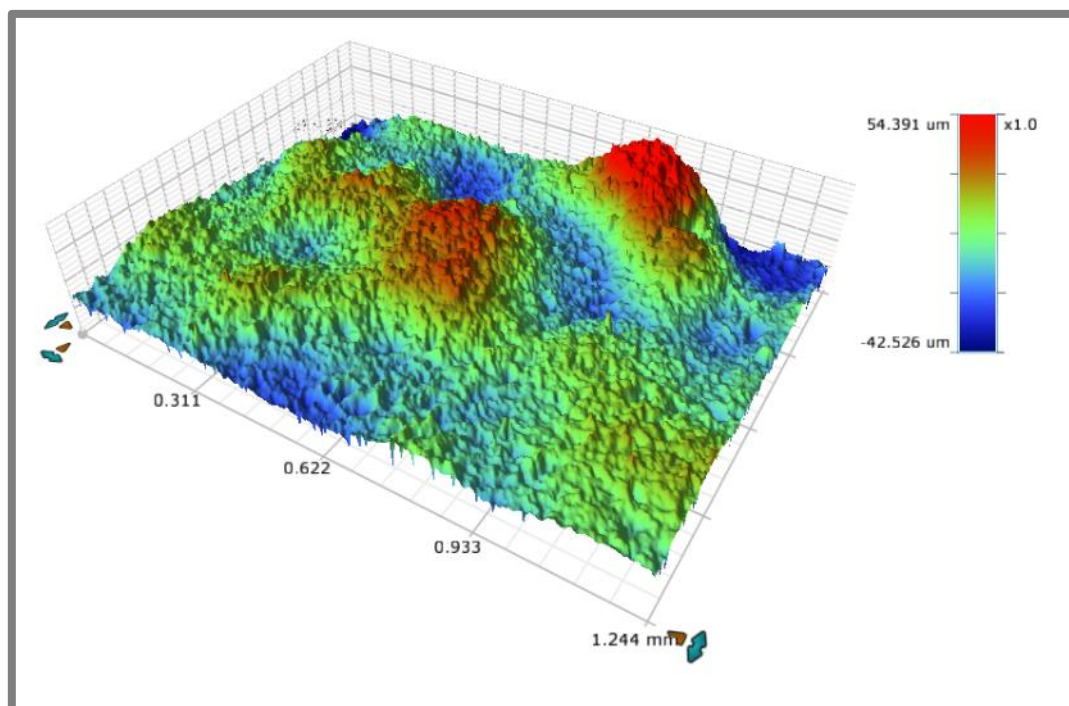
Drsnost byla měřena na několika místech tenkostěnných vzorků z tvarového testu, a to před a po otryskání. Stav před otryskáním byl označen jako „As-built“. I při použití nejmenšího objektivu byla zkoumána oblast relativně malá (pro měření velkých drsností), což vedlo k velkým rozptylům jednotlivých měření. Z naměřených hodnot byl stanoven průměr a odchylky viz Tab. 5-4. Strukturu povrchu skenovaných ploch lze vidět na Obr. 5-11 a Obr. 5-12.

Tab. 5-4 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu

	R_a	R_{a,max}	R_{a,min}
„As-built“	25,5	40,4	14,4
Po otryskání	9,8	14,2	7,6



Obr. 5-11 Struktura povrchu neotryskané plochy



Obr. 5-12 Struktura povrchu otryskané plochy

5.4 Tenkostěnné díly II

5.4

Po zhodnocení poznatků z optimalizace výroby tenkostěnných dílů byla navržena další stavba pro zlepšení porosity u stěn tloušťky 0,5 a 1,5 mm. Změny jednotlivých parametrů ukazuje Tab. 5-5 a Tab. 5-6. U tlouštěk 1,5 mm byly navrženy rozdílné odsazení kontur od vnitřní výplně v rozmezí od 0,5–0,7 mm, pro snížení výskytu pórů na okrajích vzorků. Pro snížení vnitřní porosity byl u těchto vzorků testován vliv natočení skenování oproti předchozí vrstvě s úhlem 67 °C, který vychází z [19], společně s úpravou vzdálenosti sousedních drah laseru. U stěn tloušťky 0,5 mm docházelo k velkému přerýtí jednotlivých návarů, a proto byly upraveny jejich vzdálenosti, případně byl snížen výkon laseru vnitřních kontur.

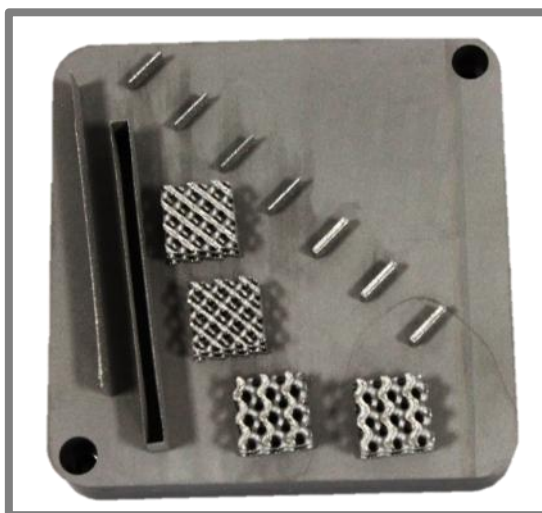
Tab. 5-5 Procesní parametry u vzorků tloušťky 1,5 mm

Kombinace parametrů	Tloušťka [mm]	Vzdálenost drah laseru [mm]	Odsazení kontur od výplně [mm]	Natočení vrstev [°]
1	1,5	0,1	0,07	67
2	1,5	0,12	0,06	90
3	1,5	0,12	0,05	67

Tab. 5-6 Procesní parametry u vzorků tloušťky 0,5 mm

Kombinace parametrů	Tloušťka [mm]	Odsazení kontur [mm]	Počet kontur [-]	Výkon laseru kontury [W]
4	0,5	0,05	2	150
5	0,5	0,05	1	150
6	0,5	0,06	2	200
7	0,5	0,06	2	100

Na vyrobených vzorcích byla zkoumána porosita, která byla porovnána s výsledky předchozího testu. Dále byly navrženy 4 struktury s různými velikostmi buněk, na kterých byla zkoumána jejich kvalita a porosita. Posledními vzorky byly tenké stěny, které byly vytvořeny jednou, resp. dvěma dráhami laseru. Fotografii všech vyrobených vzorků ukazuje Obr. 5-13.



Obr. 5-13 Tenkostěnné díly II a 3D struktury

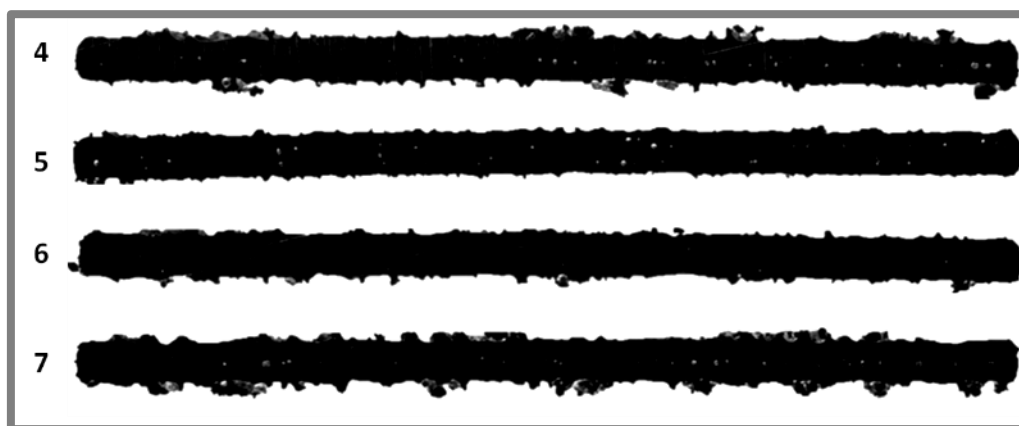
5.4.1 Vyhodnocení porosity

Po vyrobení byly vzorky odřezány a zality do licí pryskyřice pro snadnější broušení a leštění vzorků. Po vyleštění byla opět změřena relativní hustota vzorků a výsledky z měření ukazuje Tab. 5-7.

Tab. 5-7 Výsledky relativní hustoty

Kombinace parametrů	Relativní hustota [%]
1	98,83
2	99,42
3	99,20
4	99,47
5	98,94
6	99,99
7	99,27

Ze vzorků byl sestaven přehled vyleštěných ploch (viz Obr. 5-15 a Obr. 5-14), kde bylo možné zkoumat rozložení pórů u jednotlivých nastavení parametrů výroby. U nastavení parametrů s označením 6 je porosita minimální a lze toto nastavení pro stěny 0,5 mm brát jako finální. Naopak není vhodné snižovat počet kontur, jelikož výsledná porosita byla u této varianty nejvyšší.



Obr. 5-14 Mapa vzorků tloušťky 0,5 mm



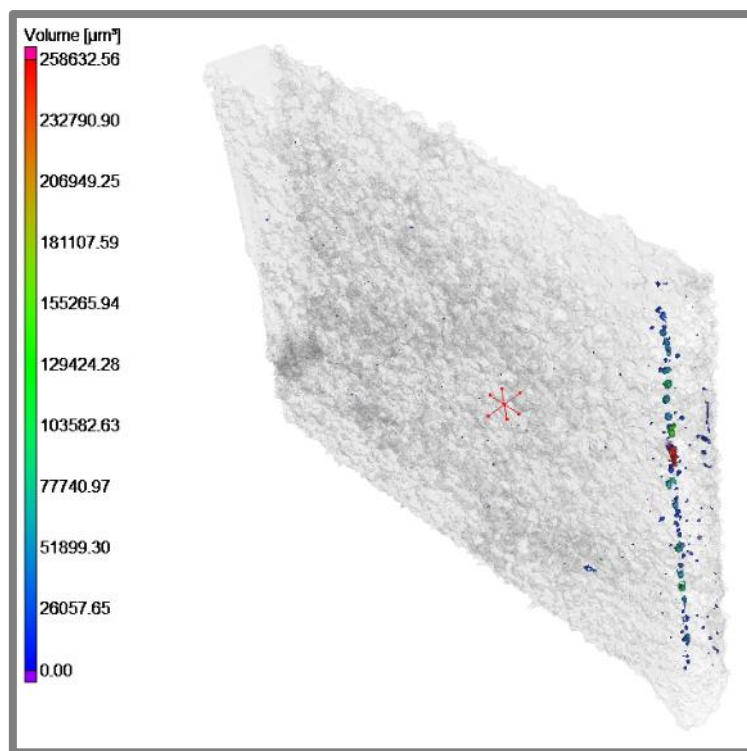
Obr. 5-15 Mapa vzorků tloušťky 1,5 mm

Nejnižší porosity na okrajích vzorků dosahovalo nastavení s označením 2, z čehož plyne optimální vzdálenost kontury od výplně 0,06 mm. Při srovnání relativní hustoty s předchozím testem je hustota téměř stejná. Z naměřených hodnot byla vybrána optimální kombinace procesních parametrů pro tloušťky 1,5 mm které jsou uvedeny v Tab. 5-8.

Tab. 5-8 Parametry pro stěny tloušťky 1,5 mm

Výkon laseru [W]	Skenovací rychlost [mm/s]	Vzdálenost drah laseru [mm]	Odsazení kontur od výplně [mm]	Natočení vrstev [°]
125	400	0,12	0,06	79

Pro přesné stanovení objemové relativní hustoty na vzorku tloušťky 0,5 mm s označením 6 byla využita počítačová tomografie. Objemová relativní hustota u vzorku tloušťky 0,5 s kombinací parametrů 6 (viz Tab. 5-6) byla naměřena 99,97 %. Fotografii se zvýrazněnými póry lze vidět na Obr. 5-16. Většina pórů se vyskytuje na hraně vzorku, což může být způsobeno vysokou koncentrací energie. Tento jev by mohl být odstraněn u většího dílu, kde by laser začal skenovat v každé vrstvě na jiném místě.



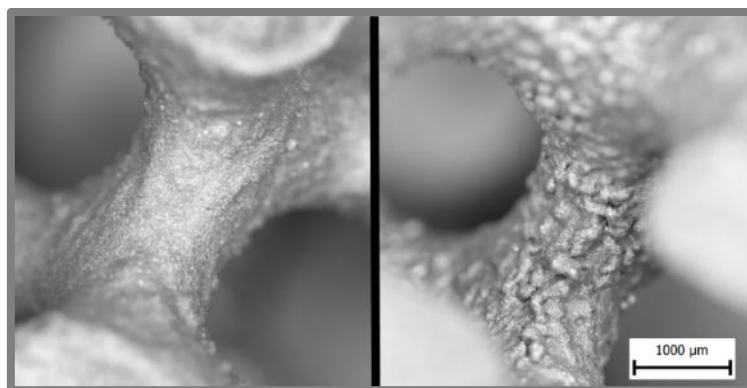
Obr. 5-16 MikroCT vzorku tloušťky 0,5 mm

5.4.2 Tenké stěny

Jak již bylo zmíněno, tyto díly byly vytvořeny pomocí jedné, resp. dvou drah laseru. Tím byla ověřena výroba nejtenčích možných dílů, které lze vyrobit. Vzorky byly nasnímány 3D skenerem a poté v softwaru GOM Inspect byla změřena jejich tloušťka. U vzorku s dvěma dráhami laseru byla tloušťka 0,29 mm a u vzorku s jednou dráhou laseru 0,16 mm. Tyto hodnoty mohou být použity pro návrhy tenkostěnných struktur, případně jiných miniaturních dílů.

5.5 3D struktury

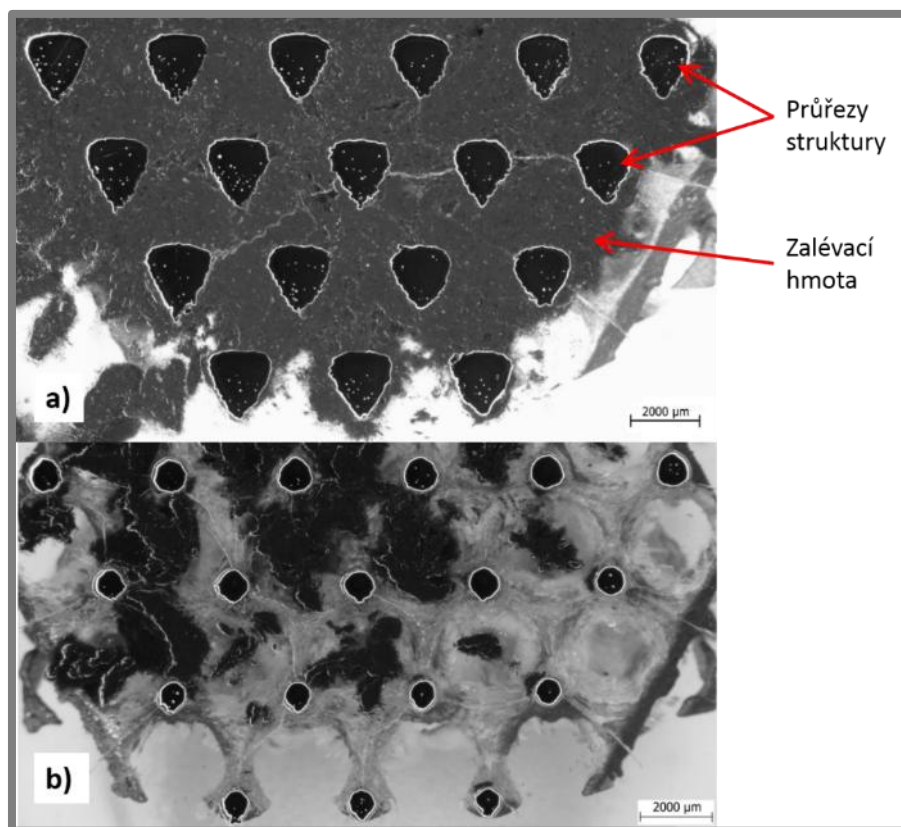
U těchto struktur byla zkoumána vyrobiteľnosť a kvalita povrchu. Jelikož plochy, na kterých byla vyhodnocována kvalita povrchu jsou zakřivené, byla zkoumána pouze vizuálně. Jak lze vidět na Obr. 5-17 u spodní plochy dochází k výraznému zhoršení povrchu, jelikož je k povrchu struktury nataven i okolní prášek. Při návrhu těchto struktur je nutné s tímto jevem počítat a případně strukturu vhodně umístit, aby nebyla ovlivněna její funkce.



Obr. 5-17 Povrch ploch struktur (vlevo vrchní, vpravo spodní)

5.5.1 Porosita u struktur typu diamond

Pro orientační vyhodnocení porosity byly vzorky pod úhlem 45° vůči výrobní desce vybroušeny a vyleštěny. Jelikož se jedná o složitý tvar průřezu, není možné pomocí obrazové metody vyhodnotit porositu vůči celému průřezu. Proto byly vybrány jednotlivé části průřezu, na kterých byla porosita vyhodnocena. Celý průřez 3D struktur zobrazuje Obr. 5-18. Naměřená porosita u objemového parametru $t=0$ resp. $0,5$ dosahovala 5 % resp. 1 %. Převážná většina pórů byla pravidelného kruhového tvaru z čehož vyplývá, že při výrobě bylo použito velké množství objemové energie. U tenkých dílů, jako jsou tyto struktury, lze očekávat vyšší koncentraci objemové energie s čím souvisí výskyt metalurgických pórů. Jakým způsobem porosita ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti bylo zkoumáno pomocí tlakové zkoušky a její simulace.



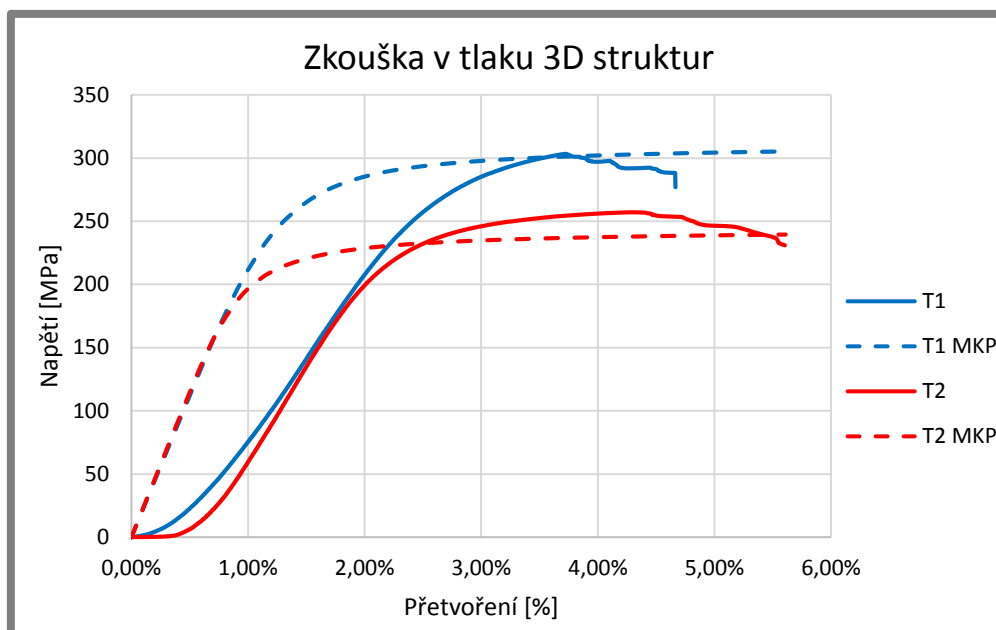
Obr. 5-18 Průřez struktur typu diamond (a) objemový parametr 0, b) objemový parametr 0,5)

5.5.2 Zkouška v tlaku 3D struktur

Reálná zkouška v tlaku 3D struktur probíhala za konstantní rychlosti stlačování vzorku 2 mm/min. Výsledkem zkoušky byla F-u křivka, která byla přepočtena na závislost napětí na prodloužení (protokol zkoušky je uveden v příloze). Plocha příčného průřezu byla brána jako vnější obálka struktury tedy $18 \times 18 \text{ mm}^2$. Graf 5-4 zobrazuje jednotlivé výsledky tlakových zkoušek. Z výsledků jsou patrné odchylky zejména u modulu pružnosti, který je u reálné tlakové zkoušky nižší o 36 %. Důvodem může být to, že při simulaci se z počátku neobjevuje plastické chování, které je způsobeno deformací stykových ploch. Mez kluzu byla odečtena z průsečíku křivky zatěžování a modulu pružnosti odsazeného o 0,2 % na ose prodloužení. Reálná mez kluzu se oproti predikované liší pouze minimálně. Dosažené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5-9.

Tab. 5-9 Dosažené hodnoty tlakové zkoušky

	T1	T2
Modul pružnosti (MKP)	22 GPa	23 GPa
Reálný modul pružnosti	14 GPa	14 GPa
Mez kluzu (MKP)	251 MPa	203 MPa
Reálná mez kluzu	262 MPa	229 MPa



Graf 5-4 Reálné a simulované zkoušky v tlaku

5.6 Mechanické testování

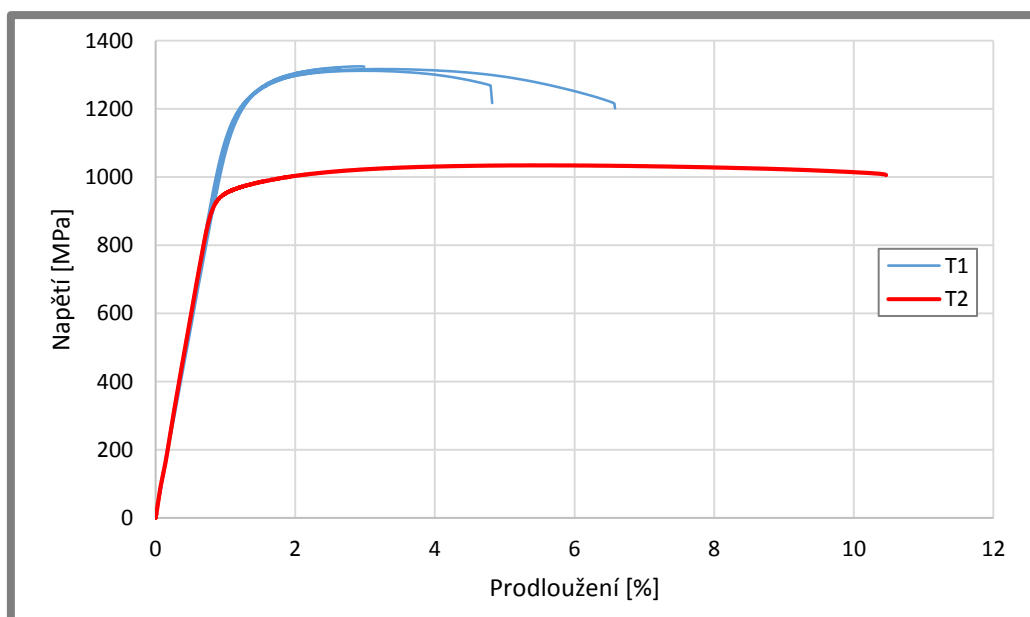
5.6

Pro výrobu vzorků pro mechanické testování byly použity parametry vyplývající z optimalizace výrobních parametrů. Použité výrobní parametry jsou uvedeny v Tab. 5-8. Tyto vzorky pak prošly tepelnou úpravou T1 a T2 uvedené v kapitole 4.4.1.

5.6.1 Tahová zkouška

5.6.1

Záznamy z tahových zkoušek zobrazuje Graf 5-5, kde lze vidět porovnání jednotlivých tepelných zpracování. Pro přehlednost jsou v Tab. 5-10 uvedeny dosažené hodnoty, protokoly z tahových zkoušek jsou uvedeny v příloze.



Graf 5-5 Porovnání tahových zkoušek u různých tepelných zpracování

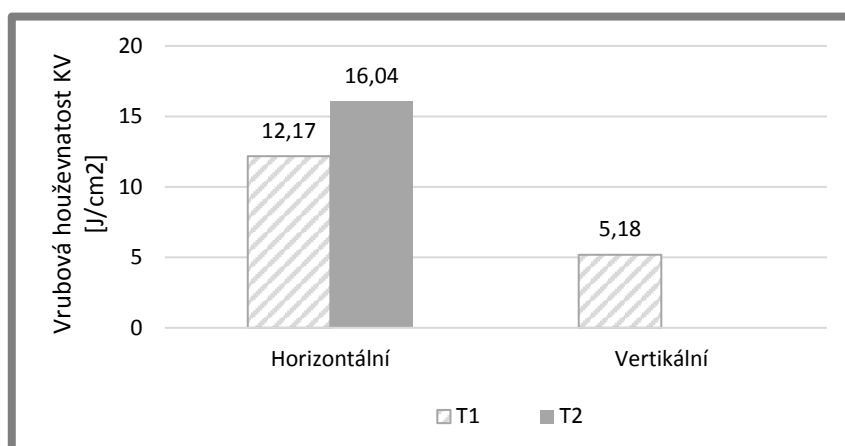
Tab. 5-10 Tahové vlastnosti

Vzorek	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{max} [%]
SLM T1	114	1 210	1 318	3,2
SLM T2	118	953	1 030	9,6

Z výsledků je patrné tepelné ovlivnění dílů vyrobených technologií SLM, které doprovází vysoké pevnostní charakteristiky. Při statistické analýze kromě tažnosti nebyly pozorovány výrazné odchylky, a proto byl u tepelného zpracování T2 použit pouze jeden vzorek. Hodnoty meze kluzu i meze pevnosti u vzorku T2 klesly, trojnásobně však byla zvýšena tažnost, díky čemuž lze očekávat zvýšení odolnosti proti křehkému lomu. Rozdílné hodnoty tažnosti u tepelného zpracování T1 mohou být způsobeny vnitřním napětím, které nebylo zcela odstraněno.

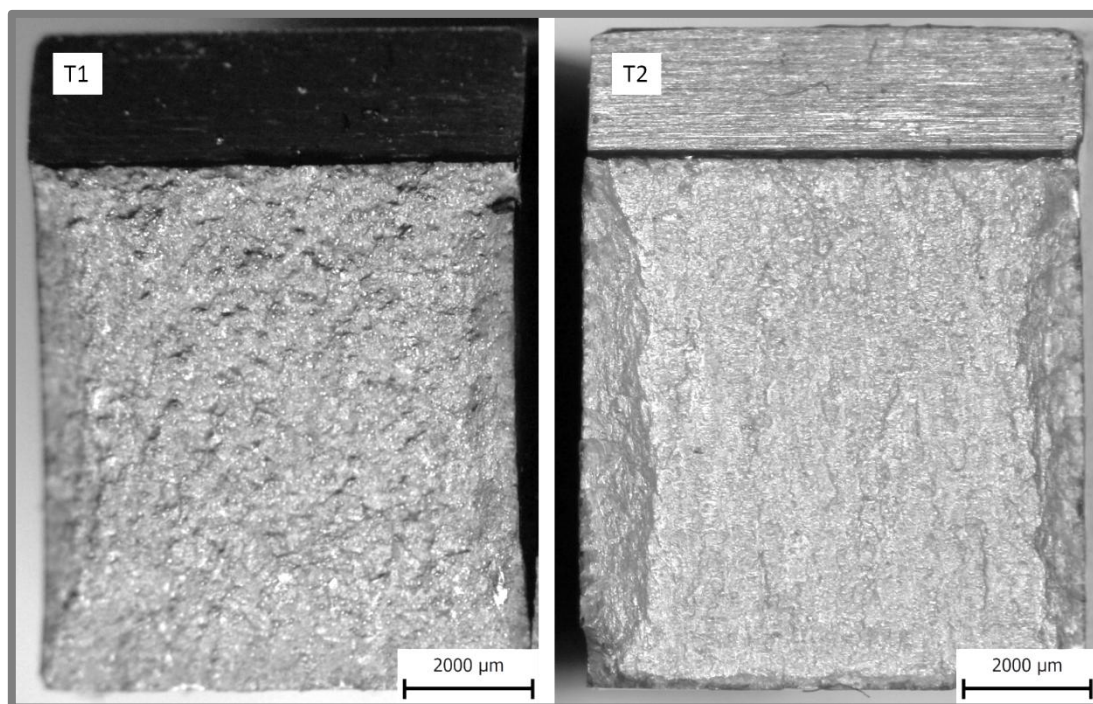
5.6.2 Zkouška rázem v ohybu

Měření nárazové energie vzorků probíhala za pokojové teploty rázovým kladivem o nominální energii 15 a 50 J v závislosti na typu vzorků. Naměřené hodnoty energií byly poté převedeny na vrubovou houževnatost, která je uvedena v Graf 5-6. Při měření horizontálních vzorků, které prošly tepelnou úpravou T1 byla naměřena vysoká odchylka hodnot. To může být opět způsobeno zbytkovým napětím, jelikož u tepelného zpracování T2 byl rozptyl 0,9 %, kdežto u T1 byl rozptyl 68 %.



Graf 5-6 Vrubová houževnatost na různých typech vzorků

Vertikální orientace stavby vykazovala výrazně nižších hodnot nárazové práce než horizontální. Rozptyl měření u vertikálních vzorků byl 6,8 %. Na Obr. 5-19 jsou fotografie lomových ploch horizontálních vzorků zpracované podle T1 a T2, z nichž vyplývá, že se jedná o křehký lom a tvar průřezu nevykazuje žádné plastické deformace. Že se jedná o křehký lom dokazují dosažené hodnoty vrubové houževnatosti. Křehký lom byl očekáván jednak proto, že se jedná o vysokopevnostní slitinu a také díky vysokým teplotním gradientům při výrobě technologií SLM. Po testování byl vzorek rozřezán pro 2D analýzu relativní hustoty, která byla naměřena 99,33 %. Tato hodnota je nižší než u tenkých vzorků, na kterých byl optimalizován výrobní proces. Nižší relativní hustota může být způsobena jiným odvodem tepla, jelikož se jedná o větší díl. Fotografie vybroušeného a vyleštěného vzorku je uvedena v příloze.

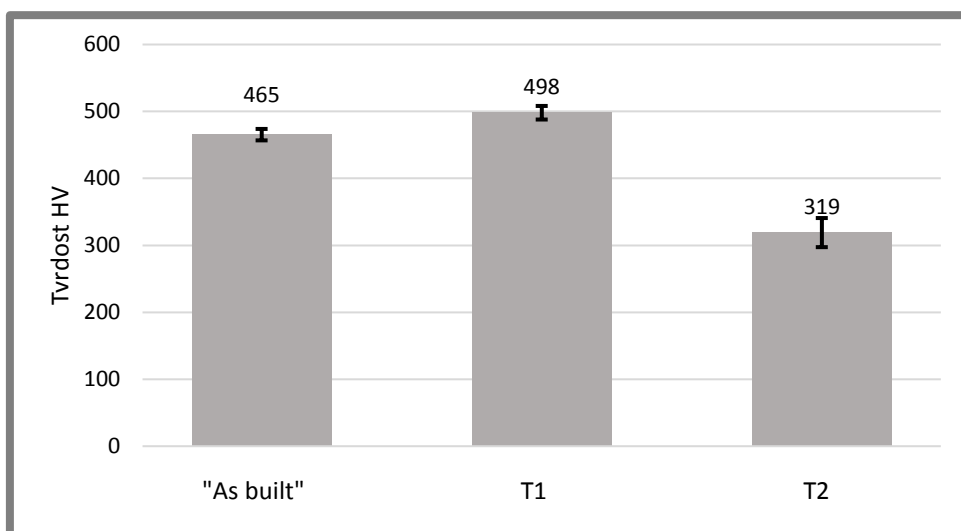


Obr. 5-19 Lomové plochy horizontálních vzorků zpracované při T1 a T2

5.6.3 Tvrdość

5.6.3

U hodnot tvrdostí byl patrný stejný trend jako u tahové zkoušky, kde díky vyšší teplotě při tepelném zpracování docházelo ke snižování pevnostních vlastností. Průměrné hodnoty vzniklé z několika měření jsou uvedeny v Graf 5-7. Výsledky také zobrazují směrodatnou odchylku, která uváděla opakovatelnost měření. Odchylka je mírně vyšší u vzorků, které byly vystavené teplotě 850 °C, pravděpodobně to může být způsobené nedostatečným odstraněním oxidační vrstvy, která byla odebrána pouze na metalografické brusce. Tento rozptyl se pohyboval v rozmezí 6 %.



Graf 5-7 Výsledky z měření tvrdostí

5.6.4 Vysokocyklová únava

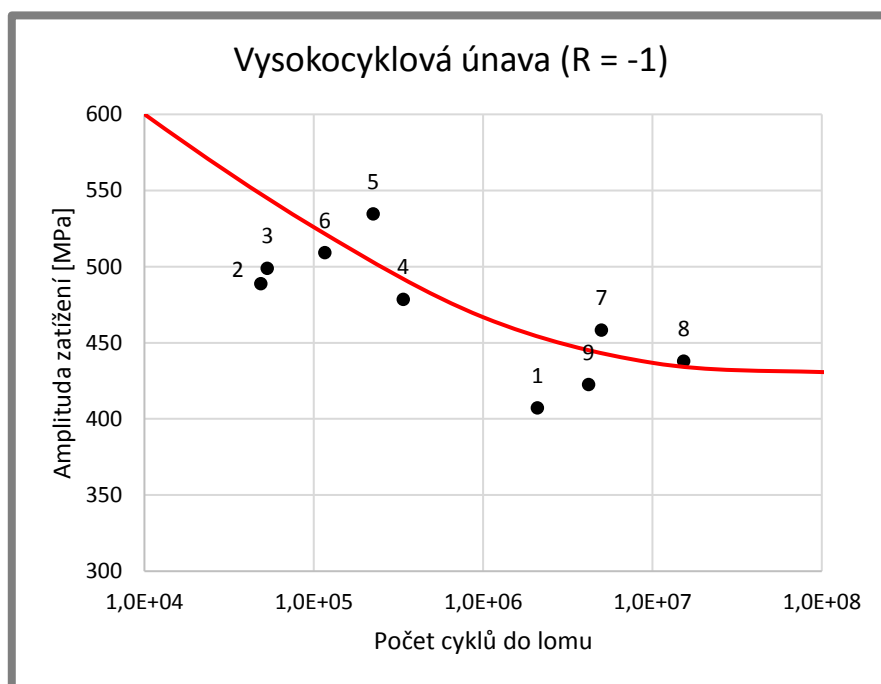
Při sestavování S-N křivky byla naměřenými daty regresní analýzou proložená funkce, jejíž tvar vychází z práce autorů **Kohout a Věchet [38]**. Tvar funkce s hodnotami konstant je uveden níže.

$$\sigma(N) = \sigma_{\infty} \left(\frac{N}{N + C} \right)^b$$

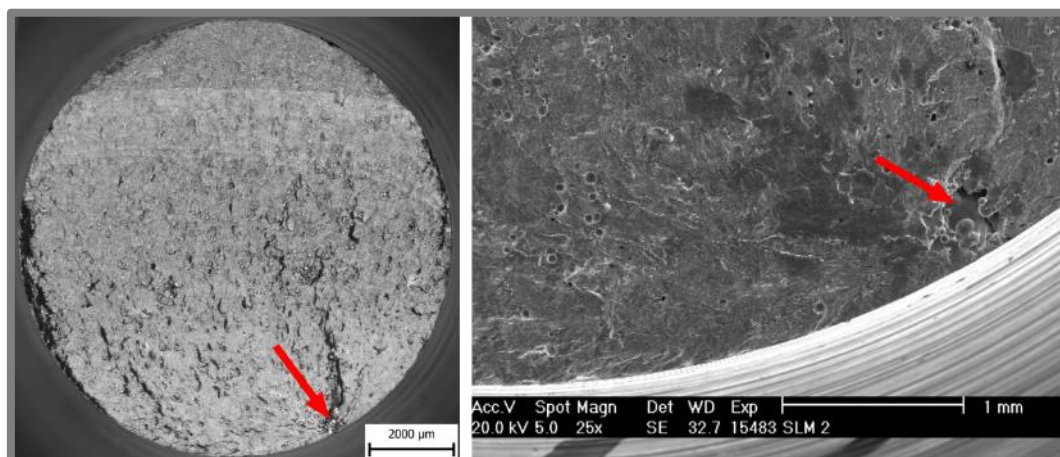
kde:

$\sigma(N)$	[MPa]	-napětí závislé počtu cyklů
σ_{∞}	[MPa]	-mez únavy - (430 MPa)
N	[-]	-počet cyklů (proměnná)
C	[-]	-regresní parametr - (3 121 381)
b	[-]	-regresní parametr - (-0,058)

Výsledná křivka s naměřenými daty je uvedena v Graf 5-8, kde mez únavy σ_{∞} byla stanovena na hodnotu 430 MPa. Pro regresní analýzu byly vyřazeny hodnoty s označením 1–3, jelikož jejich chování neodpovídalo trendu ostatních měření. Vzorky byly označeny podle pořadí skenování laserovým paprskem (1 nejdříve, 9 nejpозději). To, v jakém sledu jsou vzorky skenovány rozhoduje jejich umístění na výrobní platformě. Vzorky 1–3 byly umístěné nejdále od ústí proudu vzduchu, a proto lze jejich zhoršené mechanické vlastnosti přisuzovat právě umístění, jak bylo zmíněné v kapitole 5.2.1. Tuto hypotézu potvrzuje i analýza lomové plochy, která je na Obr. 5-20. Ta ukazuje, že trhlinka vzniká z ostrých hran póru. Relativní hustota vyrobených vzorků byla stanovena na 99,75 %, která byla určena na základě 2D analýzy, jejíž fotografie je uvedena v příloze.



Graf 5-8 S-N křivka titanové slitiny Ti6Al4V zpracované technologií SLM

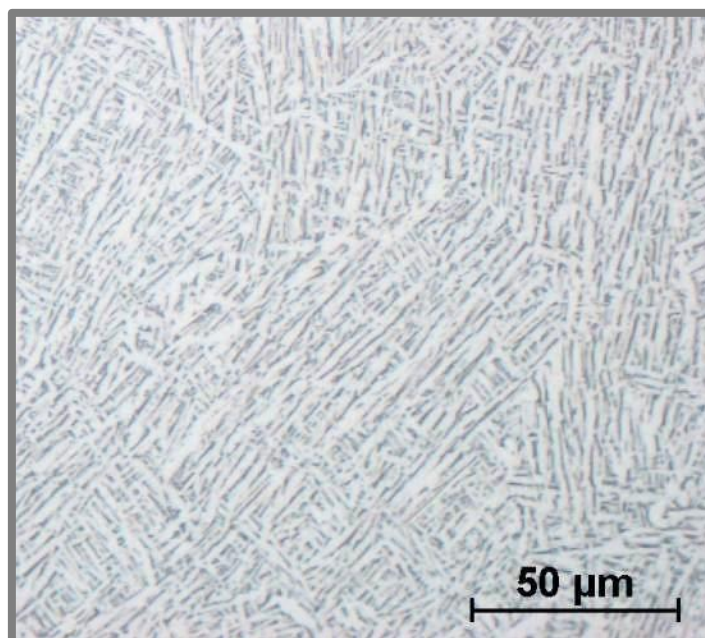


Obr. 5-20 Lomová plocha vzorku č. 2 (vpravo detail místa iniciace trhliny)

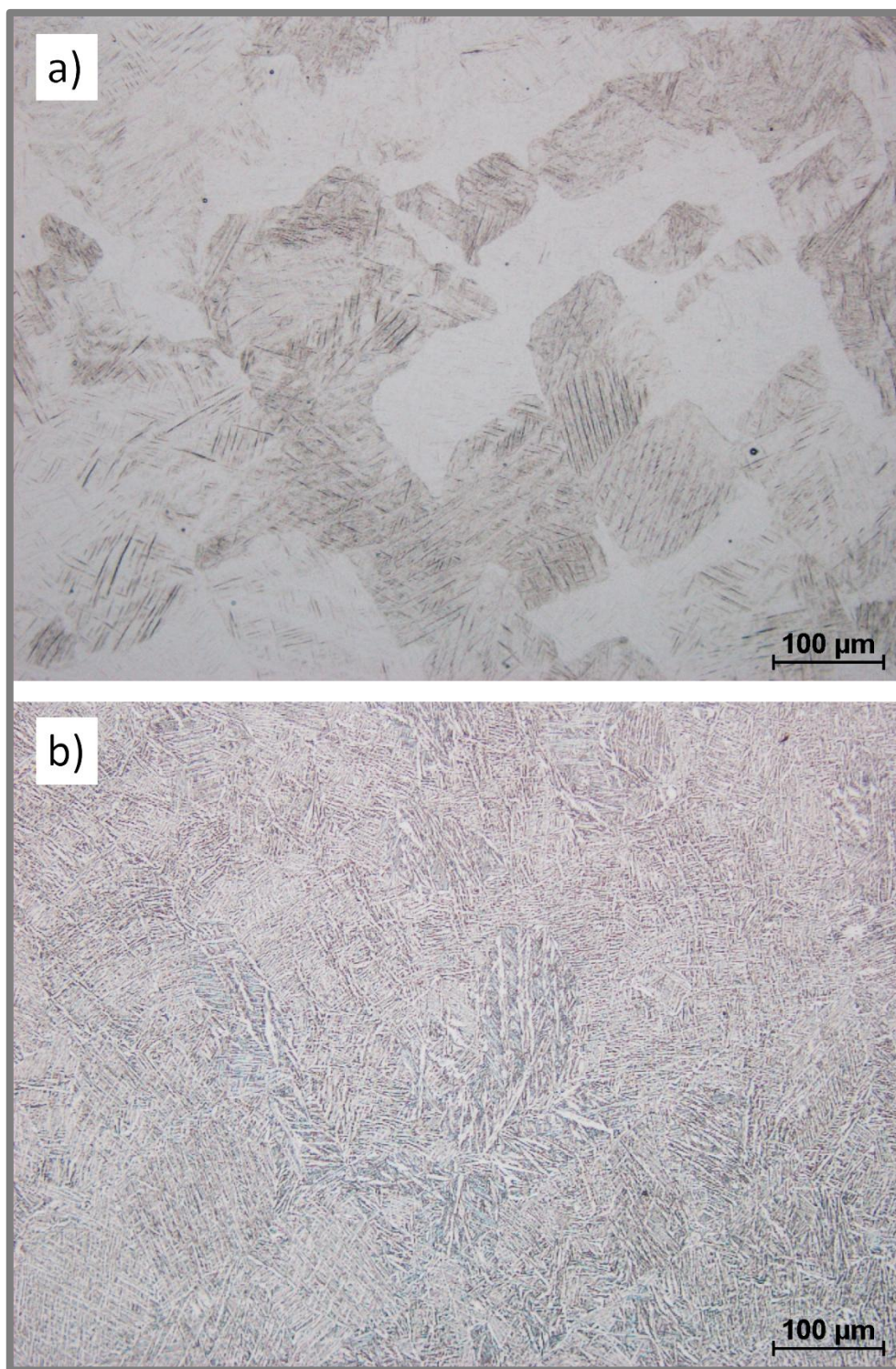
5.7 Mikrostruktura

5.7

Obr. 5-22 zobrazuje mikrostrukturu vzorků po tepelném zpracování T1, resp. T2. Při tepelném zpracování T1 lze pozorovat martenzitickou strukturu, která je utvářena v jehlicích. U takto strukturovaného materiálu lze očekávat křehké chování a vysoké pevnosti, které byly ověřeny předcházejícími testy. Díky vyšší teplotě při T2, došlo ke zhrubnutí zrna a částečné přeměně martenzitu na fáze $\alpha+\beta$. Tato přeměna umožňuje lepší plastické chování, a tedy i zvýšení tažnosti, které bylo pozorováno u tahových zkoušek. Detail na fázi $\alpha+\beta$ je lépe vidět na Obr. 5-21. Další fotografie mikrostruktury jsou uvedeny v příloze.



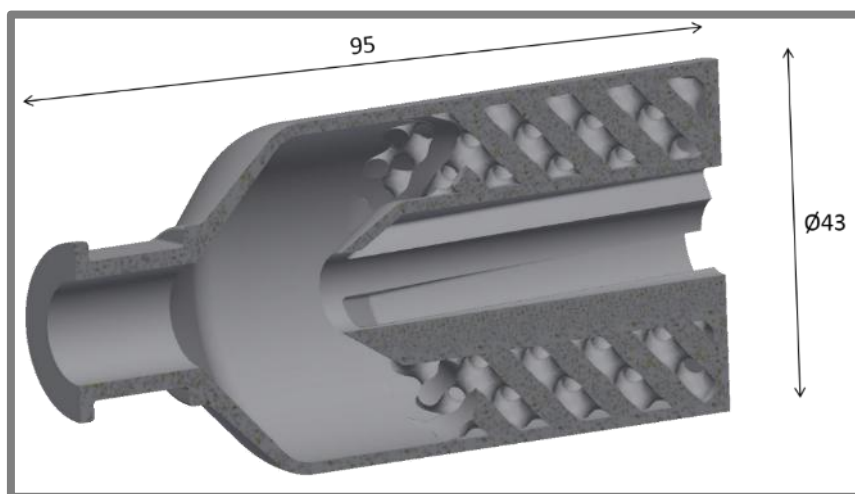
Obr. 5-21 Mikrostruktura T2 (světlé oblasti jsou fáze α , tmavé oblasti jsou β fáze)



Obr. 5-22 Mikrostruktura po tepelném zpracování T1 (a) a T2 (b)

5.8 Výroba a testování úst'ového zařízení

Tvar finálního úst'ového zařízení je výsledkem řešení diplomové práce **F. Rušara** [33]. Na Obr. 5-23 lze vidět, že se jedná o dvoukomorové zařízení, kde vnitřní část je vyplněna strukturou typu diamond. Primární funkce zařízení spočívá v přeměně toku plynů na turbulentní proudění. To je způsobeno díky 3D struktuře, která byla pro tuto funkci optimalizována. Přeměnou na turbulentní proudění ztratí plyn část energie a tím je snížena reaktivita s okolním vzduchem. Druhým konstrukčním prvkem je tvar *vortex*. Tento prvek zajišťuje řízené mísení povýstřelových plynů s okolním vzduchem čímž zabraňuje vzniku ideálního poměru k zapálení plynu a vzniku záblesku. Vnější obal je tvořen stěnou tloušťky 1,5 mm, což odpovídá tloušťce vzorků, na kterých byla optimalizována výrobní strategie. Pro pevnostní ověření byly použity reálné hodnoty mechanických vlastností. Při výpočtu zatížení byla 3D struktura pro zjednodušení nahrazena plným tělesem, s materiálovými vlastnostmi určených ze zkoušek v tlaku.



Obr. 5-23 Finální úst'ové zařízení [33]

Prototypy úst'ových zařízení byly vyrobeny na základě optimalizovaných výrobních parametrů, které byly výstupem této práce, spolu s doporučenou orientací stavby. Ta byla orientována tak aby osa zařízení byla kolmá na stavěcí desku. Správnou orientací bylo zajištěno, že hlavní zatížení bude působit ve směru nejvyšší pevnosti materiálu. Doba výroby prototypů zařízení byla 19 h. Spolu s prototypy byla vyrobena zkušební tyč pro tahovou zkoušku, aby byly přesně známy materiálové vlastnosti úst'ového zařízení. Fotografie z výroby a umístění úst'ových zařízení na platformě lze vidět na Obr. 5-24. Vyrobené prototypy byly elektrojiskrovým obráběním odstraněny z platformy, které byly poté tepelně zpracovány při teplotě 850 °C pro odstranění zbytkových napětí a zachování požadovaných únavových vlastností. Vliv tepelného zpracování je podrobně popsán v kapitole 5.6. Pro zlepšení kvality povrchu a odstranění oxidační vrstvy byly zařízení otryskány ručním tryskacím zařízením. Úst'ové zařízení byly vyrobeny s přesahem pro výrobu závitu, který byl vytvořen třískovým obráběním.



Obr. 5-24 Fotografie z výroby úst'ových zařízení

Testování prototypů probíhalo na uzavřené střelnici společnosti CZUB (viz Obr. 5-25), kde byla také vyhodnocena funkčnost zařízení. Byly porovnány dosavadní řešení a nově navržené úst'ové zařízení. Během testování bylo s každým zařízením provedeno cca 30 výstřelů. Na žádném zařízení se nevyskytovaly viditelné trhliny ani jiné poškození, čímž byla ověřena správnost pevnostních výpočtů spolu s mechanickými vlastnostmi, které byly výstupem této práce.



Obr. 5-25 Testování vyrobeného úst'ového zařízení

6 DISKUZE

6

Studium dosavadních druhů úst'ových zařízení poukázalo na to, že jejich tvar je převážně kruhových průřezů a tloušťky jednotlivých částí jsou v rozmezí 1–2 mm. Kombinace existujících řešení a nových prvků vyrobených technologií SLM jako jsou např. 3D struktury umožní spojit několik funkcí úst'ových zařízení v jednotný celek. Z analýzy současného stavu vyplynuly tvary vzorků, na které byly optimalizovány výrobní strategie. Výrobní proces byl poté aplikován pro výrobu vzorků pro ověření mechanických vlastností.

6.1 Optimalizace výrobního procesu

6.1

Z analýzy prášku vyplývá, že převážná většina částic jsou kruhového průřezu, a tudíž je použitý prášek vhodný pro zpracování technologií SLM. Distribuce částic zase poukazuje na výběr vhodné tloušťky vrstvy, která byla zvolena 50 μm . Ta byla zvolena na základě velikosti jednotlivých částic, kde střední hodnota byla 40 μm .

První optimalizace parametrů proběhla na krychlových tělesech o délce hrany 5 mm, ze kterých bylo vybráno 5 různých nastavení s relativní hustotou vyšší než 99,85 %. Tyto parametry pak byly použity na výrobu tenkostěnných dílů. Už při prvním pohledu bylo zřejmé, že, relativní hustota tenkostěnných dílů je nižší než u krychlových vzorků. To mohlo být způsobeno jejich geometrií, kdy menší příčný průřez zajišťoval nižší odvod tepla. Menší odvod tepla způsoboval vysoké teploty taveniny, ve které se pak utvářely metalurgické póry vzniklé odpařujícím se plynem. Dalším nepříznivým jevem, který se objevil u tenkostěnných těles byla vyšší porosita vzorků umístěných dále od ústí plynu. Tento jev byl sledován i u jiných zařízení a je způsoben rozstříkem již spálených částic viz např. [20, 21]. Z tohoto důvodu byly již další vzorky umístěny diagonálně, aby jejich skenování neovlivňovalo kvalitu ostatních vzorků. Optimalizací výrobního procesu bylo dosaženo relativní hustoty u vzorků tloušťky 0,5 mm 99,97 %, která byla měřena v celém objemu vzorku pomocí mikroCT. U vzorků tloušťky 1,5 mm byla relativní hustota 99,47 %. Kvalita vyráběných dílů byla také určena z rozměrové přesnosti a z drsnosti povrchu. Rozměrové odchylky dosahovaly hodnot $\pm 0,04$ mm. U kolmých ploch docházelo k mírnému natavení okolního prášku, který zvyšoval odchylku od požadovaného tvaru a také výrazně zhoršoval drsnost povrchu. Proto bylo jako post-processing použito otryskání, pro odstranění nataveného prášku. Při výrobě 3D struktur bylo detekováno mnohem větší natavení prášku na vodorovných plochách. Tento jev ale není možné zcela odstranit, z důvodu složité geometrie struktur.

6.2 Použití tepelné zpracování

6.2

Při výrobě větších dílů, byla zjištěna deformace stavěcí desky, která byla způsobena zbytkovým napětím vzniklým při výrobě. Z toho důvodu bylo aplikováno tepelné zpracování při teplotě 380 °C, kterým byla deska srovnána za minimálního ovlivnění mechanických vlastností. Další tepelné zpracování bylo za teploty 850 °C, kterým byla zvýšena tažnost a zlepšení únavových vlastností. Díky vyšší teplotě došlo ke zhrubnutí zrna, které vede ke zlepšení vlastností v plastické oblasti.

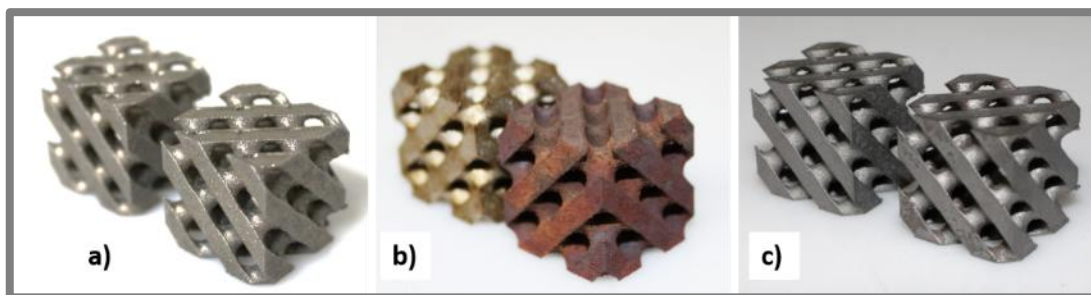
6.2.1 Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti

Díly vyrobené technologií SLM doprovází zvýšené zbytkové napětí způsobené rychlým zchladnutím taveniny. Zbytkové pnutí pak negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti, a především pak způsobuje vysoký rozptyl v naměřených datech jednotlivých vzorků jak bylo zmíněno v práci autorů **Becker et al. [29]**. Tento jev byl pozorován u testování vrubové houževnatosti, kdy nižší teplota zpracování vykazovala rozptyl 68 %, ale při použití vyšší teploty byl rozptyl pouze 0,9 %.

Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti je patrný ze záznamu z tahových zkoušek. U tepelného zpracování za teploty 380 °C vykazoval materiál vysokou mez kluzu i pevnosti, ale při tepelném zpracování za teploty 850 °C došlo ke snížení těchto hodnot o 21 %. Výhodou tepelného zpracování T2 bylo trojnásobné zvýšení tažnosti, které přispívá ke snížení křehkého chování. Křehký lom byl pozorován také u zkoušek vrubové houževnatosti, která dosahovala hodnoty maximálně 23 J/cm². Křehké chování titanové slitiny lze přisuzovat tomu, že se jedná o vysokopevnostní kov s nízkou houževnatostí.

6.2.2 Oxidace titanové slitiny

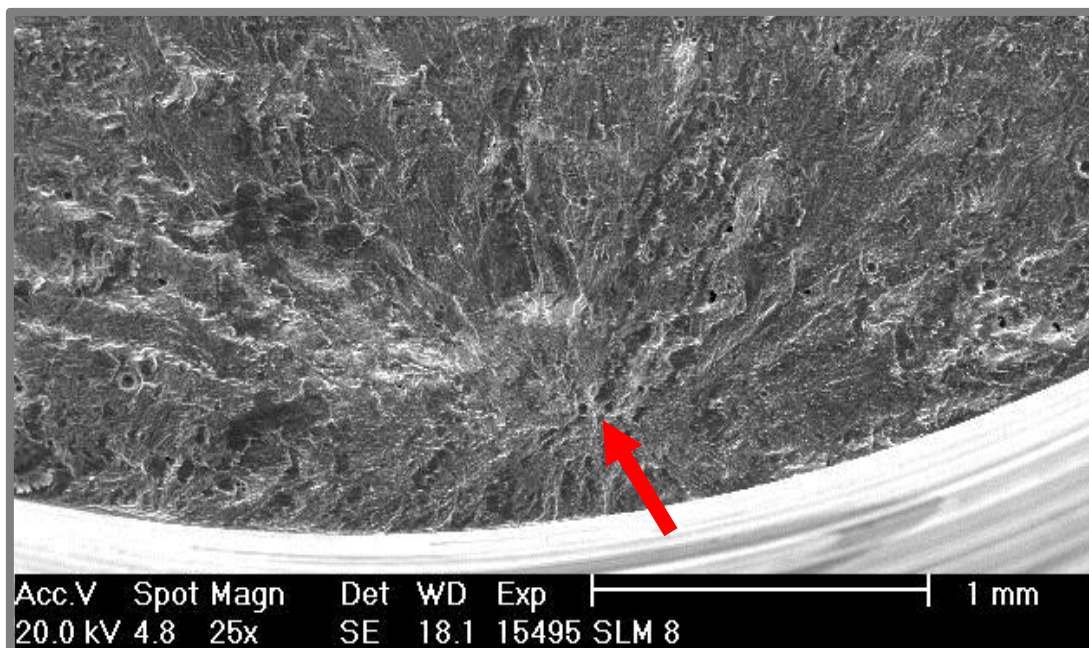
V této práci bylo tepelné zpracování realizováno za přítomnosti okolního vzduchu, díky čemuž byla pozorována oxidace na povrchu vzorků. Při teplotě 380 °C dosahovala vrstva TiO₂ tvrdost 498 HV. Vzniklé oxidační vrstvy byly před každým testováním odstraněny třískovým obráběním, nebo otryskáním. Na Obr. 6-1 lze vidět oxidaci struktur typu diamond, která byla odstraněna otryskáním.



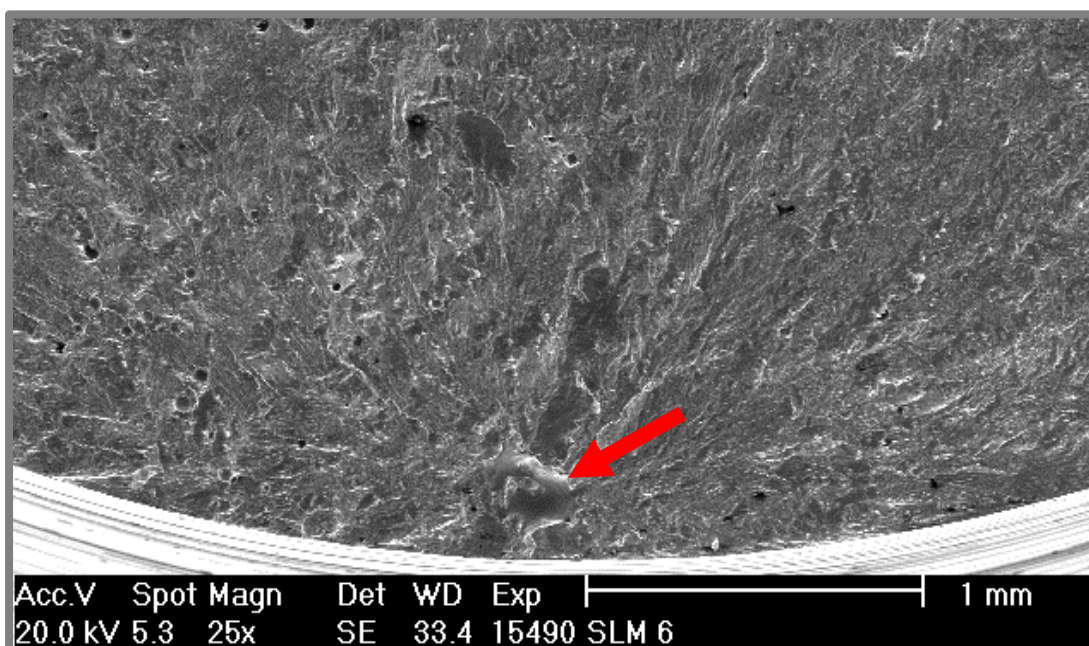
Obr. 6-1 Oxidace 3D struktur (a) po vyrobení, b) po tepelném zpracování T1 a T2, c) po otryskání)

6.3 Vliv porosity na únavovou životnost

Při měření vysokocyklové únavy dosahovaly některé vzorky výrazně nižší dobu životnosti, než byla předpokládána. Tyto odchylky pak byly dobře vidět v sestavené S-N křivce, kde bylo patrné jejich ovlivnění. Po analýze lomové plochy vzorků s předčasným porušením pak bylo zřejmé, že iniciační místo trhliny vychází z póru vzniklého při nedostatku energie. Obr. 6-3 ukazuje místo iniciace trhliny u vzorku č. 8 v oblasti výskytu metalurgického póru a Obr. 6-2 u vzorku č. 6 v oblasti póru vzniklého nedostatkem energie. Z lomových ploch je pak patrné, že póry působí jako koncentrace napětí. U metalurgických pórů je ale toto napětí mnohonásobně menší, jelikož vzorek č. 8 vydržel více než 15 mil. cyklů. Relativní hustota únavových vzorků byla 99,75 % a typy pórů byly převážně metalurgické, které jsou méně nebezpečné. Výskyt pórů je ovlivněn umístěním na platformě, kdy vzorky dále od ústí plynu dosahují horší kvality vlivem rozstříku kapalného kovu.



Obr. 6-3 Místo iniciace trhliny u vzorku č. 8 (počet cyklů do lomu 15 323 000)



Obr. 6-2 Místo iniciace trhliny u vzorku č. 6 (počet cyklů do lomu 116 500)

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na optimalizaci SLM procesu výroby úst'ových zařízení a zjištění mechanických vlastností titanové slitiny Ti-6Al-4V. V první fázi řešení bylo potřeba nalézt vhodné skenovací strategie zajišťující vysokou relativní hustotu dílů. Díky optimalizaci výrobních parametrů se podařilo vyrobit tenkostěnný díl s relativní hustotou 99,97 %. Odladění parametrů probíhalo na vzorcích, jejichž tvary byly odvozeny na základě současných řešení úst'ových zařízení.

Jelikož byl požadavek zkombinovat více funkcí úst'ových zařízení v jeden konstrukční celek, bylo přistoupeno k návrhu, který obsahoval odlehčené struktury. Ty byly podrobeny důkladné analýze, kde byla zkoumána jejich kvalita a také pevnostní charakteristiky ověřené tlakovou zkouškou. Výsledky byly porovnány s predikcí získanou MKP výpočtem kde se ukázalo, že v určitých oblastech zatížení je možné simulovat chování odlehčených struktur.

Při výrobě bylo detekováno zvýšené zbytkové napětí u větších dílů způsobené rychlým zchladnutím taveniny při výrobě. Proto byly použity dva druhy tepelných zpracování, které zbytkové napětí snižovaly. Pro každé tepelné zpracování pak byly zjištěny mechanické vlastnosti. Ty úzce souvisely s mikrostrukturou, která zobrazovala jednotlivé přeměny. Z testování bylo také patrné výrazné křehké chování slitiny Ti-6Al-4V, které se ale podařilo snížit vyšší teplotou při tepelném zpracování. Bylo potvrzeno, že při vyšší teplotě titanová slitina reaguje s okolním vzduchem za vzniku oxidační vrstvy. Tuto vrstvu je však možné jednoduše odstranit otryskáním. Při testování vysokocyklové únavy bylo detekováno výrazné snížení životnosti dílů, který obsahoval póry vzniklé nedostatkem energie. Tyto póry několika násobně zvyšovaly koncentraci napětí než póry metalurgické.

Výrobní parametry byly odzkoušeny na výrobě tenkostěnných dílů, díky čemuž mohou být dále použity pro návrhy součástí, kde je požadována vysoká pevnost a zároveň nízká hmotnost. Tepelným zpracováním pak lze docílit požadovaných mechanických vlastností pro určitou aplikaci.

V průběhu optimalizace výrobního procesu byla pozorována nižší relativní hustota vzorků umístěných dále od ústí ochranného plynu, s čímž souviselo i zhoršení mechanických vlastností. Navázat na tuto práci je možné ve výzkumu vlivu umístění na výslednou relativní hustotu, případně vhodnými úpravami tento jev odstranit.

Během testování prototypů úst'ových zařízení bylo ověřeno, že technologii SLM lze využít i při výrobě součástí ve zbraňovém průmyslu. Po demontáži úst'ových zařízení nebylo detekováno žádné poškození, čímž byly ověřeny správné materiálové vlastnosti.

Primární i dílčí cíle diplomové práce byly splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Will Additive Manufacturing Put Milling Machines Out of Work? *American Machinist* [online]. Penton, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://americanmachinist.com/beyond-cutting-zone/will-additive-manufacturing-put-milling-machines-out-work>
- [2] PLÍHAL, Bohumil. *Balistika*. Brno: Univerzita obrany, 2011. ISBN 978-80-7231-785-1.
- [3] PLÍHAL, Bohumil. *Přechodová balistika hlavních zbraní*. Brno: Univerzita obrany, 2007. ISBN 978-80-7231-242-9.
- [4] *Silencer Talk* [online]. 2014 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.silencertalk.com/forum/viewtopic.php?t=137176>
- [5] FÍŠER, Miloslav, Stanislav PROCHÁZKA a Jozef ŠKVAREK. *Hlavně palných zbraní*. Brno: Univerzita obrany, 2006. ISBN 80-723-1157-3.
- [6] Why do pipes burst they way they do? *Data Genetics* [online]. 2013 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://datagenetics.com/blog/december222013/index.html>
- [7] LIU, T, Z C DENG a T J LU. Minimum weights of pressurized hollow sandwich cylinders with ultralight cellular cores. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2007, **44**(10), 3231–3266. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2006.09.018
- [8] LIU, T, Z C DENG a T J LU. Bi-functional optimization of actively cooled, pressurized hollow sandwich cylinders with prismatic cores. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [online]. 2007, **55**(12), 2565–2602. ISSN 00225096. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmps.2007.04.007
- [9] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, **62**, 32–38. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002
- [10] FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917–1928. ISSN 15441024. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-014-0958-z
- [11] LAWATSCHECK, Tina Hartmann-h. Metal Laser Melting. *Laser-Technik-Journal* [online]. 2015, **12**, 41–43. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201500027
- [12] SPEARS, Thomas G. a Scott A. GOLD. In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation* [online]. 2016, **5**(2), 1–25. ISSN 2193-9764. Dostupné z: doi:10.1186/s40192-016-0045-4
- [13] RIGO, Olivier a Engel CARSTEN. *SlideShare* [online]. 2016 [vid. 2016-11-08]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/carstenengel/selective-laser-melting-versus-electron-beam-melting>
- [14] ABOULKHAIR, Nesma T, Nicola M EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, **1**, 77–86. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2014.08.001
- [15] KASPEROVICH, Galina, Jan HAUBRICH, Joachim GUSSONE a Guillermo REQUENA. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. 2016, **105**, 160–170.
- [16] YASA, E a Jean-Pierre KRUTH. APPLICATION OF LASER RE-MELTING

- ON SELECTIVE LASER MELTING PARTS. 2011, **6**, 259–270.
- [17] THOMAS, D a R BIBB. An Investigation into the Geometric Constraints of Selective Laser Melting for the Development of Design Rules. In: *Ninth National Conference on Rapid Design*. 2008.
- [18] VORA, Pratik, Kamran MUMTAZ, Iain TODD a Neil HOPKINSON. AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **7**, 12–19. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2015.06.003
- [19] SIMONELLI, M, Y Y TSE a C TUCK. A Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti – 6Al – 4V. *Materials Science & Engineering A* [online]. 2014, **616**, 1–11. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2014.07.086
- [20] LADEWIG, Alexander, Georg SCHLICK, Maximilian FISSER, Volker SCHULZE a Uwe GLATZEL. Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process. 2016, **10**, 1–9.
- [21] KONG, Chang-jing, Christopher J TUCK, Ian A ASHCROFT, Ricky D WILDMAN a Richard HAGUE. HIGH DENSITY Ti6Al4V VIA SLM PROCESSING: MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES. 2011, 475–483.
- [22] Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed. *ASM* [online]. 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641>
- [23] CARDAROPOLI, Francesco, Vittorio ALFIERI, Fabrizia CAIAZZO a Vincenzo SERGI. Manufacturing of porous biomaterials for dental implant applications through Selective Laser Melting [online]. 2012, 1222–1229. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1222
- [24] CAMPANELLI, Sabina L., Nicola CONTUZZI, Antonio D. LUDOVICO, Fabrizia CAIAZZO, Francesco CARDAROPOLI a Vincenzo SERGI. Manufacturing and characterization of Ti6Al4V lattice components manufactured by selective laser melting. *Materials* [online]. 2014, **7**(6), 4803–4822. ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma7064803
- [25] VRANCKEN, Bey, Lore THUIS, Jean-Pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2012, **541**, 177–185. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2012.07.022
- [26] KASPEROVICH, Galina a Joachim HAUSMANN. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, **220**, 202–214. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.01.025
- [27] KNOWLES, Craig, T BECKER a R TAIT. The effect of heat treatment on the residual stress levels within direct metal laser sintered Ti-6Al-4V as measured using the ... 2014, (November 2012).
- [28] KONEČNÁ, Radomila, Ludvík KUNZ, Adrián BAČA a Gianni NICOLETTO. Long fatigue crack growth in Ti6Al4V produced by direct metal laser sintering [online]. 2016, **160**(Icmfm Xviii), 69–76. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.08.864

- [29] BECKER, T, M BECK a C. SCHEFFER. Microstructure and mechanical properties of direct metal laser sintered Ti-6Al-4V. *The South African Journal of Industrial Engineering*. 2015, **26**(May), 1–10.
- [30] LEUDERS, S., M. THÖNE, A. RIEMER, T. NIENDORF, T. TRÖSTER, H. A. RICHARD a H. J. MAIER. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue* [online]. 2013, **48**, 300–307. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
- [31] SEFER, Birhan. *Oxidation and Alpha-Case Phenomena in Titanium Alloys used in Aerospace Industry: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V*. 2014. ISBN 9789174399288.
- [32] REIS, D.A.P., F. PIORINO, M.J.R. BARBOZA, M.C.A. NONO a C.R.M. SILVA. INFLUENCE OF THE OXIDATION IN CREEP OF TI-6Al-4V ALLOY. In: *XIX Congress of the Brazilian Society for Microscopy and Microanalysis*. 2003, s. 219–220.
- [33] RUŠAR, F. *Univerzální ústřední zařízení na útočnou pušku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 110 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D..
- [34] *Selective Laser Melting versus Electron Beam Melting* [online]. 2013 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/carstenengel/selective-laser-melting-versus-electron-beam-melting>
- [35] ATOS Triple Scan. *MCAE* [online]. SnadnýWeb [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [36] *Laboratoř tribologie* [online]. WebsON [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/tribology-laboratory/>
- [37] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [38] KOHOUT, J. a S. VĚCHET. International Journal of Fatigue. *International Journal of Fatigue* [online]. 2001, **23**(2), 175–183. Dostupné z: doi:10.1016/S0142-1123(00)00082-7
- [39] SIMONELLI, Marco, Yau Yau TSE a Chris TUCK. On the texture formation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* [online]. 2014, **45**(6), 2863–2872. ISSN 10735623. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-014-2218-0

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
3D	trojrozměrný
SLM	Selective Laser Melting
CAD	Computed Aided Design
HIP	Hot isostatic pressing (tepelné zpracování za zvýšeného tlaku)
MKP	metoda konečných prvků
VUT	Vysoké učení technické
CCD	Charge-Coupled Device
T1	Tepelné zpracování při teplotě 380 °C
T2	Tepelné zpracování při teplotě 850 °C
CT	Computed Tomography
HV	Hardness Vickers
HRC	Hardness Rockwel C
STL	stereolitography (datový formát)
As-built	stav vzorku po vyrobení

Symbol	Jednotka	Veličina
E_v	[J/mm ³]	objemová energie
P	[W]	výkon laseru
v_s	[mm/s]	skenovací rychlost
h_D	[mm]	vzdálenost drah laseru (hatch distance)
t_L	[mm]	tloušťka vrstvy
σ_y	[MPa]	mez kluzu
UTS	[MPa]	mez pevnosti
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
$\epsilon_{\text{fracture}}$	[%]	prodloužení při porušení
σ	[MPa]	napětí
ϵ	[%]	prodloužení
D_{10}	[-]	10% decil
D_{90}	[-]	90% decil
K	[J]	nárazová práce
K_C	[J/cm ²]	vrubová houževnatost
S_0	[cm ²]	plocha příčného průřezu zkušební tyče v místě vrubu
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
F	[N]	síla
u	[mm]	deformace
$R_{p0,2}$	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A_{max}	[MPa]	maximální dosažená tažnost
$\sigma(N)$	[MPa]	napětí závislé na počtu cyklů
σ_{∞}	[MPa]	mez únavy
N	[-]	počet cyklů
C	[-]	regresní parametr
b	[-]	regresní parametr
R	[-]	parametr asymetrie

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Příklad použití technologie SLM [1]	15
Obr. 2-1 Tlumič hluku [4]	16
Obr. 2-2 Průběhy složek napětí , poškození trubek vlivem vnitřního přetlaku [6] ...	16
Obr. 2-3 Struktura dosahující nejvyšší pevnosti [7]	17
Obr. 2-4 Struktura umožňující vysoký odvod tepla [8].....	17
Obr. 2-5 Příklad gyroidní struktury [9]	18
Obr. 2-6 Schéma procesu výroby [13] (přeloženo)	19
Obr. 2-7 Procesní parametry SLM [14] (přeloženo)	19
Obr. 2-8 Druhy pórů v závislosti na objemové energii [15].....	20
Obr. 2-9 Vliv porosity na rychlosti skenování [15].....	21
Obr. 2-10 Princip výskytu drsnosti při výrobě šikmých ploch [16]	21
Obr. 2-11 Vliv stavěcího úhlu na nutnost struktur [17].....	22
Obr. 2-12 Vliv podpůrných struktur na deformaci desky [18]	22
Obr. 2-13 Orientace stavby vzorků posle [19].....	23
Obr. 2-14 Použitá úprava trysek (a) stávající stav, b) úzká štěrbina) [21]	24
Obr. 2-15 Závislost výrobních parametrů na porositě [26]	26
Obr. 2-16 Vliv orientace stavby na růst trhliny [28]	27
Obr. 2-17 Porovnání referenčního a SLM materiálu [25]	27
Obr. 2-18 Porovnání tepelných zpracování [25].....	28
Obr. 2-19 Studium růstu trhliny u Ti6Al4V [30]	28
Obr. 2-20 Creepové křivky v závislosti na druhu atmosféry [32]	29
Obr. 4-1 Tvary částic použitého prášku.....	32
Obr. 4-2 Vzorky 5x5x5 mm ³	33
Obr. 4-3 Zvolená skenovací strategie [39]	33
Obr. 4-4 Skenovací strategie (kontura červeně, fill kontura žlutě, rozměry v μm) ...	34
Obr. 4-5 Rozložení vzorků na stavěcí desce.....	35
Obr. 4-6 Tenkostěnné díly nejmenší možné tloušťky	36
Obr. 4-7 Oxidační vrstva titanových vzorků vzniklá při 850 °C.....	38
Obr. 4-8 Rozmístění vzorků v první sadě.....	39
Obr. 4-9 Umístění únavových vzorků na platformě	40
Obr. 4-10 Struktury použité pro analýzu tvaru (a) struktury typu gyroid, b) struktury typu diamond).....	41
Obr. 4-11 Konečně prvková síť 3D struktury.....	42
Obr. 5-1 Přehled vybraných vzorků.....	44
Obr. 5-2 Horní povrch vzorků	44
Obr. 5-3 Výsledek porovnání 3D a naskenovaných dat	45
Obr. 5-4 Hranový efekt na kontuře vzorku.....	46
Obr. 5-5 Přehled tenkostěnných vzorků tloušťky 1,5 a 2 mm.....	47
Obr. 5-6 Výskyt porosity na okrajích vzorků	49
Obr. 5-7 Vzdálenost výskytu porosity od kraje vzorku.....	49
Obr. 5-8 Výskyt pórů u stěn tloušťky 0,5 mm.....	50
Obr. 5-9 Proud inertního plynu.....	50
Obr. 5-10 Povrch před (vlevo) a po otryskání	51
Obr. 5-11 Struktura povrchu neotryskané plochy	52
Obr. 5-12 Struktura povrchu otryskané plochy	53
Obr. 5-13 Tenkostěnné díly II a 3D struktury	54

Obr. 5-14 Mapa vzorků tloušťky 0,5 mm	55
Obr. 5-15 Mapa vzorků tloušťky 1,5 mm	55
Obr. 5-16 MikroCT vzorku tloušťky 0,5 mm	56
Obr. 5-17 Povrch ploch struktur (vlevo vrchní, vpravo spodní).....	57
Obr. 5-18 Průřez struktur typu diamond (a) objemový parametr 0, b) objemový parametr 0,5).....	58
Obr. 5-19 Lomové plochy horizontálních vzorků zpracované při T1 a T2	61
Obr. 5-20 Lomová plocha vzorku č. 2 (vpravo detail místa iniciace trhliny).....	63
Obr. 5-21 Mikrostruktura T2 (světlé oblasti jsou fáze α , tmavé oblasti jsou β fáze) 63	
Obr. 5-22 Mikrostruktura po tepelném zpracování T1 (a) a T2 (b).....	64
Obr. 5-23 Finální úst'ové zařízení [33]	65
Obr. 5-24 Fotografie z výroby úst'ových zařízení.....	66
Obr. 5-25 Testování vyrobeného úst'ového zařízení.....	66
Obr. 6-1 Oxidace 3D struktur (a) po vyrobení, b) po tepelném zpracování T1 a T2, c) po otryskání)	68
Obr. 6-2 Místo iniciace trhliny u vzorku č. 6 (počet cyklů do lomu 116 500)	69
Obr. 6-3 Místo iniciace trhliny u vzorku č. 8 (počet cyklů do lomu 15 323 000)	69
Graf 4-1 Rozložení velikosti částic prášku	32
Graf 4-2 Průběh teplot v peci a na povrchu vzorku	37
Graf 4-3 Multilineární model materiálu.....	41
Graf 5-1 Porosita rovných stěn v závislosti na výrobních parametrech	46
Graf 5-2 Porosita válcových stěn v závislosti na výrobních parametrech	48
Graf 5-3 Závislost porosity na umístění (výkon laseru 125 W).....	51
Graf 5-4 Reálné a simulované zkoušky v tlaku	59
Graf 5-5 Porovnání tahových zkoušek u různých tepelných zpracování.....	59
Graf 5-6 Vrubová houževnatost na různých typech vzorků	60
Graf 5-7 Výsledky z měření tvrdostí	61
Graf 5-8 S-N křivka titanové slitiny Ti6Al4V zpracované technologií SLM	62

11 SEZNAM TABULEK**11**

Tab. 2-1 Výsledky tahových zkoušek	23
Tab. 2-2 Porovnání materiálů	24
Tab. 2-3 Použité výrobní parametry [23]	25
Tab. 2-4 Použité výrobní parametry [25]	25
Tab. 2-5 Použité parametry [25]	25
Tab. 2-6 Tepelné zpracování jednotlivých vzorků [30]	28
Tab. 4-1 Základní parametry stroje SLM 280 ^{HL} [34]	31
Tab. 4-2 Výsledky z měření velikosti částic	31
Tab. 4-3 Parametry skenování	35
Tab. 4-4 Základní parametry optické profilometru Bruker ContourGT-X8 [36]	36
Tab. 4-5 Použité tepelné zpracování	37
Tab. 5-1 Vybrané výrobní parametry	43
Tab. 5-2 Dosažená relativní hustota u rovných stěn (Kombinace par. 4)	47
Tab. 5-3 Dosažená relativní hustota u válcových stěn (Kombinace par. 4)	48
Tab. 5-4 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu	52
Tab. 5-5 Procesní parametry u vzorků tloušťky 1,5 mm	53
Tab. 5-6 Procesní parametry u vzorků tloušťky 0,5 mm	54
Tab. 5-7 Výsledky relativní hustoty	54
Tab. 5-8 Parametry pro stěny tloušťky 1,5 mm	55
Tab. 5-9 Dosažené hodnoty tlakové zkoušky	58
Tab. 5-10 Tahové vlastnosti	60

12 SEZNAM PŘÍLOH

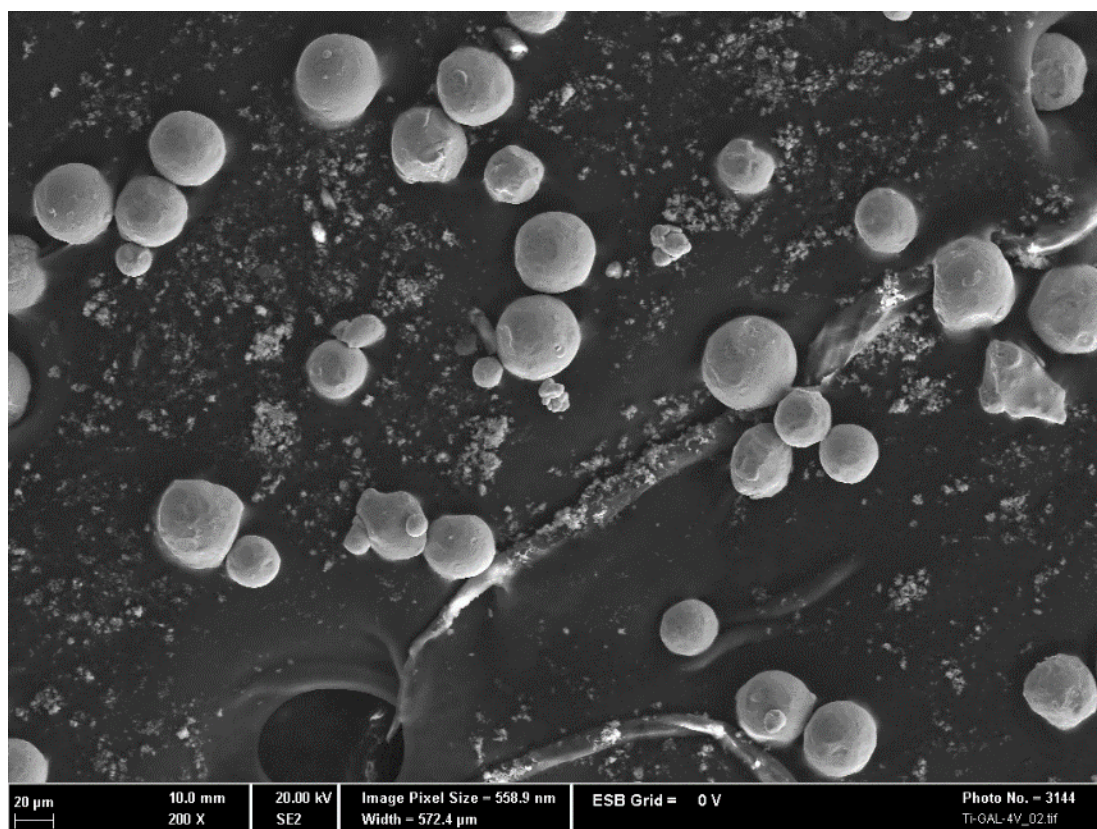
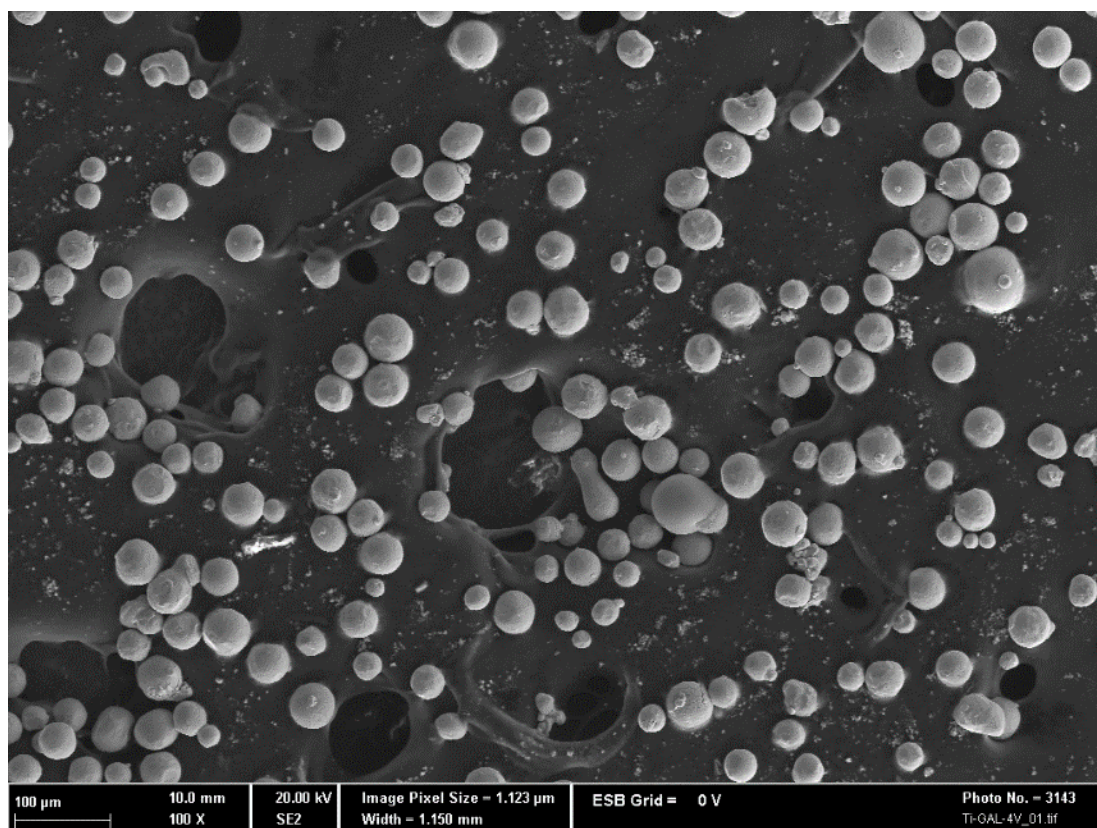
Příloha 1	Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V zpracované technologií SLM ..	79
Příloha 2	Fotografie použitého prášku.....	80
Příloha 3	Protokol z měření velikosti částic prášku.....	82
Příloha 4	Test procesních parametrů (data)	83
Příloha 5	Přehled vyleštěných rovinných vzorků	85
Příloha 6	Přehled vyleštěných kruhových vzorků	86
Příloha 7	Fotografie vyleštěného řezu vzorkem pro test vrubové houževnatosti	87
Příloha 8	Fotografie vyleštěného řezu vzorkem pro test vysokocyklové únavy	88
Příloha 9	Fotografie mikrostruktury T1	89
Příloha 10	Fotografie mikrostruktury T2.....	91
Příloha 11	Protokol ze zkoušky v tlaku 3D struktur.....	93
Příloha 12	Protokol z tahové zkoušky T1	94
Příloha 13	Protokol z tahové zkoušky T2.....	95
Příloha 14	Výkres vzorku pro tahovou zkoušku.....	96
Příloha 15	Výkres vzorku pro test vrubové houževnatosti.....	97
Příloha 16	Výkres vzorku pro test vysokocyklové únavy	98

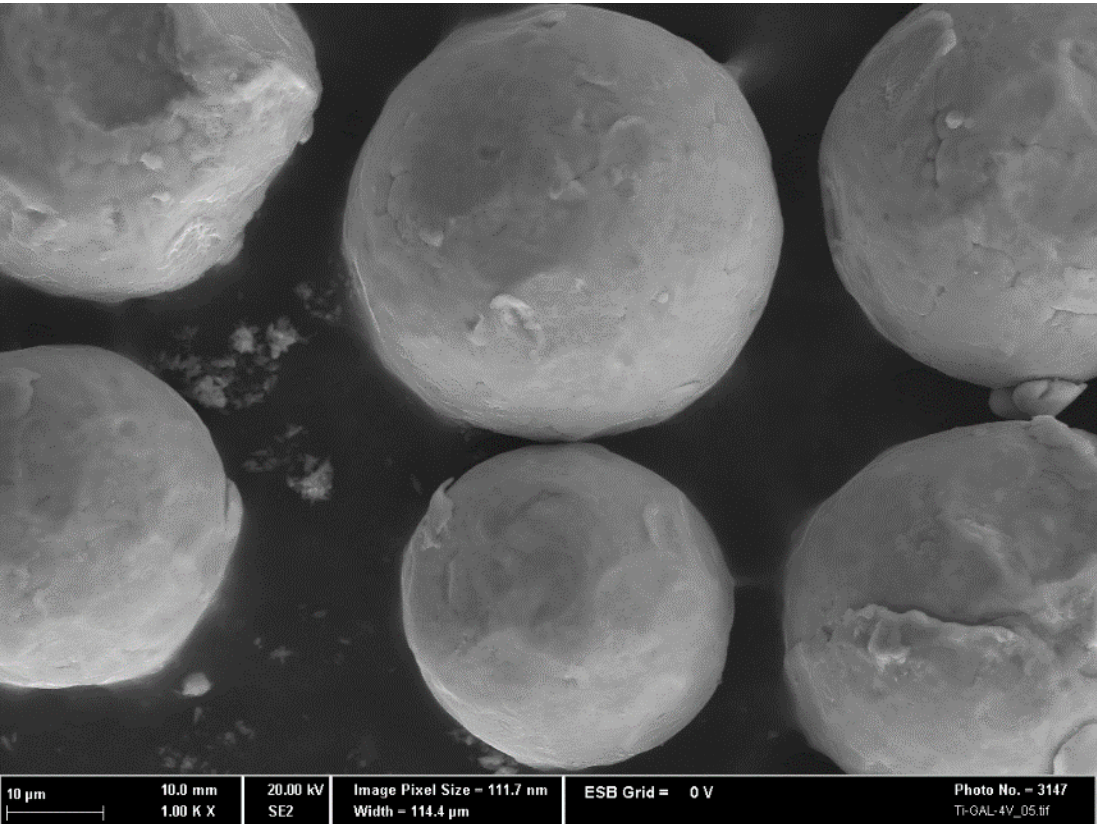
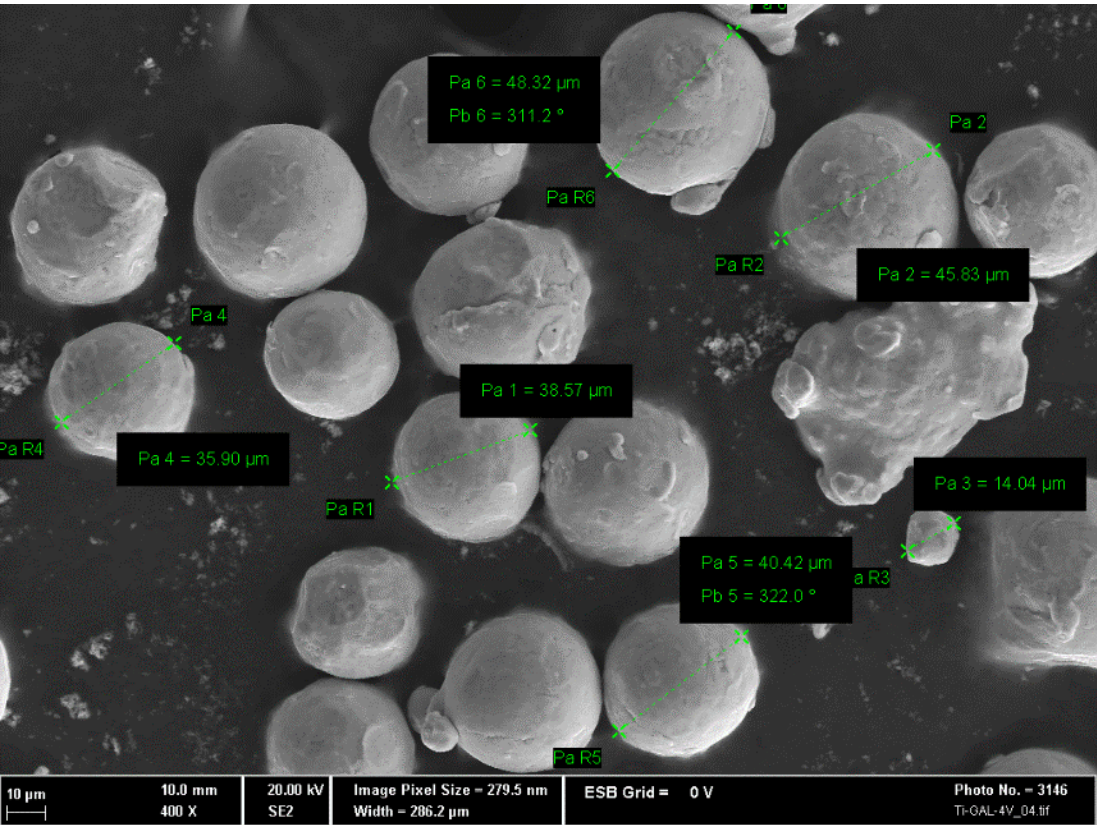
Příloha 1 Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V zpracované technologií SLM

Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V (SLM)			
Název	Tepelné zpracování		
	AS-built	T1	T2
Modul pružnosti (E)	-	114 GPa	118 GPa
Mez kluzu ($R_{p0,2}$)	-	1 210 MPa	1 318 MPa
Mez pevnosti (R_m)	-	953 MPa	1 030 MPa
Tažnost (A)	-	3,2 %	9,6 %
Vrubová houževnatost (KV)	-	12,17 J/cm ²	16,04 J/cm ²
Tvrdost	465 HV	498 HV	319 HV
Mez únavy (σ_c)	-	-	430 MPa
Drsnost povrchu (po vyrobení)	Ra 25,5	-	-
Drsnost povrchu (po otryskání)	Ra 9,8	-	-

Poznámka: As-built značí vzorek, který neprošel žádnou tepelnou úpravou
 T1 – tepelné zpracování při teplotě 380 °C po dobu 8,5 h a ochlazení v peci
 T2 – tepelné zpracování při teplotě 850 °C po dobu 2 h a ochlazení v peci

Příloha 2 Fotografie použitého prášku



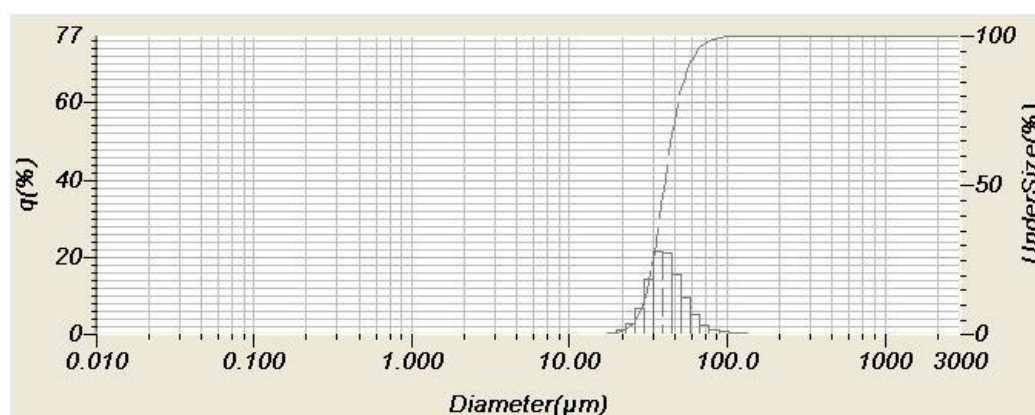


Příloha 3 Protokol z měření velikosti částic prášku

2017.01.16 05:52:59

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyze

Sample Name	:		Median Size	:	40.36785(μm)
ID#	:	201701160447203	Mean Size	:	42.57677(μm)
Data Name	:	TiAl6V4 2.	Std.Dev.	:	12.5494(μm)
Transmittance(R)	:	87.1(%)	Geo.Mean Size	:	40.9802(μm)
Transmittance(B)	:	93.7(%)	Geo.Std.Dev.	:	1.3118(μm)
Circulation Speed	:	8	Mode Size	:	37.4604(μm)
Agitation Speed	:	7	Span	:	OFF
Ultra Sonic	:	OFF	Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 29.6499(μm)
Form of Distribution	:	Auto		:	(9)90.00 (%) - 58.0186(μm)
Distribution Base	:	Volume			
Refractive Index (R)	:	Unknown Sample[F(3.500 - 10.000i).Water(1.333)]			
Refractive Index (B)	:	Unknown Sample[F(3.500 - 10.000i).Water(1.333)]			
Material	:				
Source	:				



No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	N
1	0.011	0.000	0.000	20	0.150	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	58	25.111	2.575	3.721	7
2	0.013	0.000	0.000	21	0.172	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	59	29.907	6.706	10.426	7
3	0.015	0.000	0.000	22	0.197	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	60	34.255	14.070	24.497	7
4	0.017	0.000	0.000	23	0.225	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	61	39.234	21.139	45.636	8
5	0.020	0.000	0.000	24	0.259	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	62	44.938	20.797	66.433	8
6	0.022	0.000	0.000	25	0.296	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	63	51.471	15.422	81.856	8
7	0.025	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	64	58.953	9.231	91.087	8
8	0.029	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	65	67.523	4.816	95.903	8
9	0.034	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	66	77.339	2.290	98.193	8
10	0.039	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	67	88.583	1.015	99.207	8
11	0.044	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	68	101.460	0.455	99.662	8
12	0.051	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	69	116.210	0.218	99.880	8
13	0.058	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	70	133.103	0.120	100.000	8
14	0.067	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	52	11.565	0.000	0.000	71	152.453	0.000	100.000	9
15	0.076	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	72	174.616	0.000	100.000	9
16	0.087	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	54	15.172	0.000	0.000	73	200.000	0.000	100.000	9
17	0.100	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	55	17.377	0.000	0.000	74	229.075	0.000	100.000	9
18	0.115	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	56	19.904	0.278	0.278	75	262.376	0.000	100.000	
19	0.131	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	57	22.797	0.868	1.146	76	300.518	0.000	100.000	

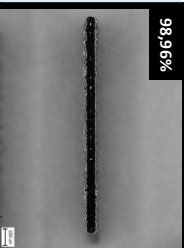
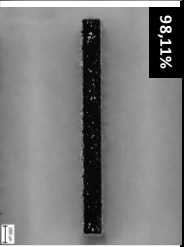
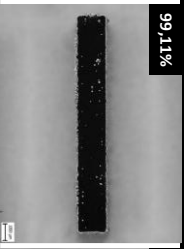
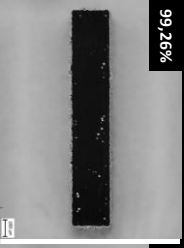
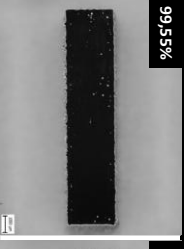
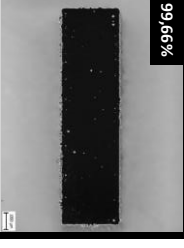
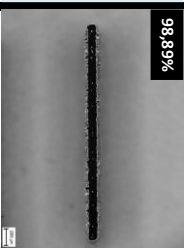
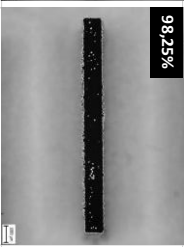
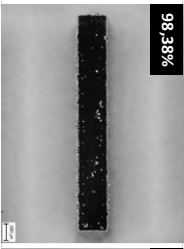
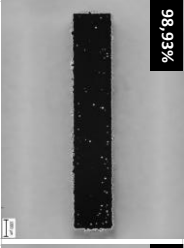
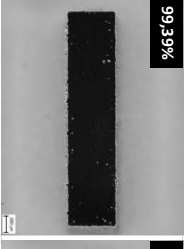
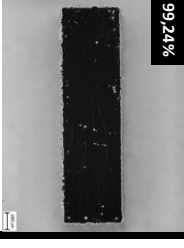
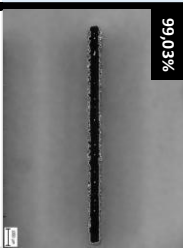
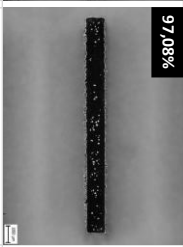
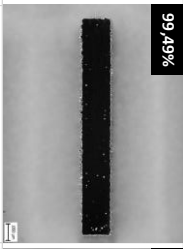
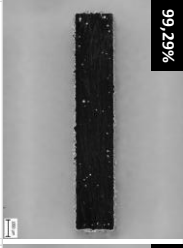
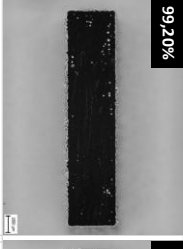
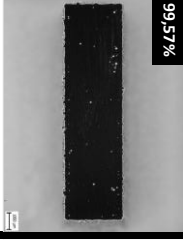
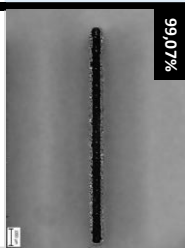
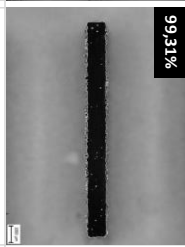
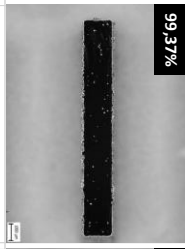
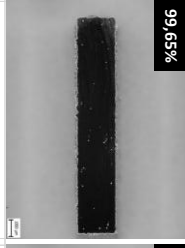
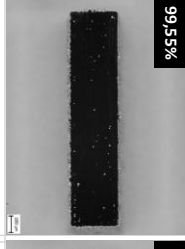
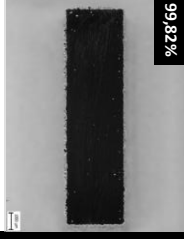
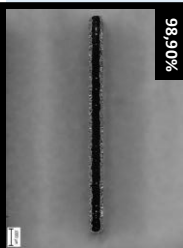
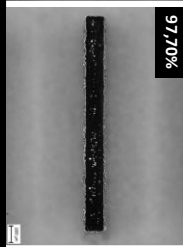
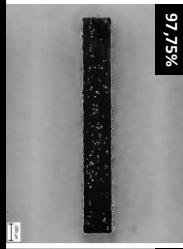
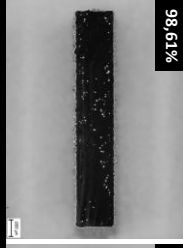
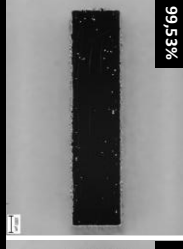
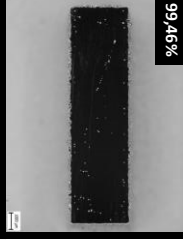
1 / 1

Příloha 4 Test procesních parametrů (data)

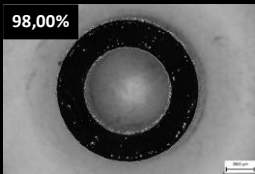
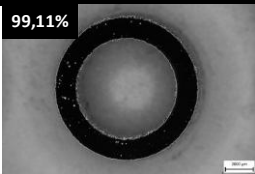
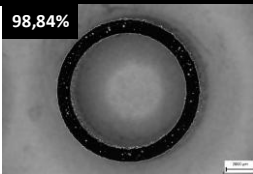
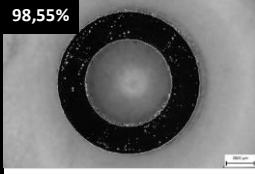
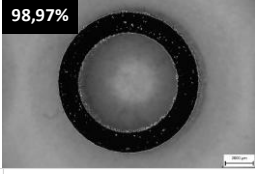
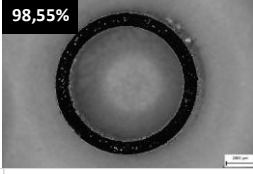
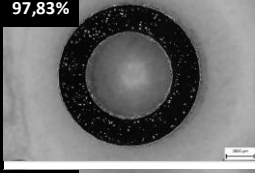
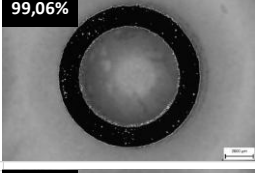
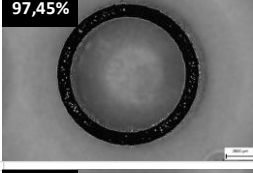
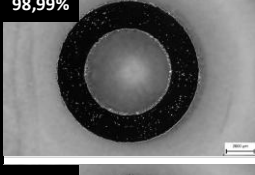
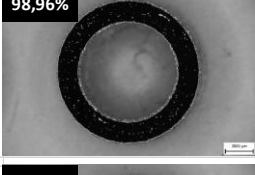
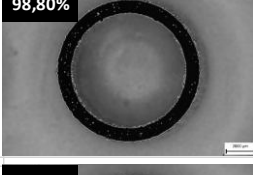
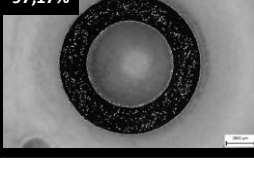
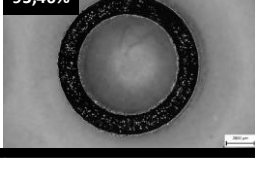
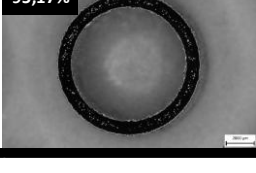
Sample No.	Laser power	Laser speed	Energy density [J/mm ³]	Relative density, %
FZ-1-TSD-TD01-001	42	50	140,00	91,50
FZ-1-TSD-TD01-002	42	100	70,00	87,72
FZ-1-TSD-TD01-003	42	150	46,67	82,23
FZ-1-TSD-TD01-004	42	200	35,00	75,37
FZ-1-TSD-TD01-005	100	200	83,33	99,81
FZ-1-TSD-TD01-006	100	250	66,67	99,85
FZ-1-TSD-TD01-007	100	300	55,56	99,82
FZ-1-TSD-TD01-008	100	350	47,62	99,52
FZ-1-TSD-TD01-009	100	400	41,67	98,38
FZ-1-TSD-TD01-010	100	450	37,04	97,86
FZ-1-TSD-TD01-011	100	500	33,33	94,10
FZ-1-TSD-TD01-012	125	200	104,17	99,94
FZ-1-TSD-TD01-013	125	250	83,33	99,87
FZ-1-TSD-TD01-014	125	300	69,44	99,85
FZ-1-TSD-TD01-015	125	350	59,52	99,82
FZ-1-TSD-TD01-016	125	400	52,08	99,89
FZ-1-TSD-TD01-017	125	450	46,30	97,62
FZ-1-TSD-TD01-018	125	500	41,67	97,89
FZ-1-TSD-TD01-019	175	300	97,22	99,88
FZ-1-TSD-TD01-020	175	350	83,33	99,81
FZ-1-TSD-TD01-021	175	400	72,92	99,39
FZ-1-TSD-TD01-022	175	450	64,81	99,49
FZ-1-TSD-TD01-023	175	500	58,33	99,76
FZ-1-TSD-TD01-024	175	550	53,03	99,89
FZ-1-TSD-TD01-025	200	200	166,67	96,61
FZ-1-TSD-TD01-026	200	300	111,11	99,07
FZ-1-TSD-TD01-027	200	400	83,33	99,81
FZ-1-TSD-TD01-028	200	500	66,67	99,73
FZ-1-TSD-TD01-029	200	600	55,56	99,31
FZ-1-TSD-TD01-030	200	700	47,62	99,87
FZ-1-TSD-TD01-031	225	400	93,75	94,70
FZ-1-TSD-TD01-032	225	450	83,33	99,33
FZ-1-TSD-TD01-033	225	550	68,18	98,93
FZ-1-TSD-TD01-034	225	658	56,99	99,93
FZ-1-TSD-TD01-035	225	750	50,00	99,93
FZ-1-TSD-TD01-036	225	850	44,12	99,50

FZ-1-TSD-TD01-037	225	900	41,67	99,69
FZ-1-TSD-TD01-038	275	550	83,33	97,82
FZ-1-TSD-TD01-039	275	600	76,39	98,79
FZ-1-TSD-TD01-040	275	700	65,48	99,71
FZ-1-TSD-TD01-041	275	805	56,94	99,68
FZ-1-TSD-TD01-042	275	900	50,93	99,93
FZ-1-TSD-TD01-043	275	1000	45,83	99,88
FZ-1-TSD-TD01-044	275	1050	43,65	99,68
FZ-1-TSD-TD01-045	300	800	62,50	99,27
FZ-1-TSD-TD01-046	300	900	55,56	99,52
FZ-1-TSD-TD01-047	300	1000	50,00	99,50
FZ-1-TSD-TD01-048	300	1100	45,45	99,72
FZ-1-TSD-TD01-049	300	1200	41,67	99,69
FZ-1-TSD-TD01-050	350	800	72,92	99,32
FZ-1-TSD-TD01-051	350	900	64,81	99,61
FZ-1-TSD-TD01-052	350	1000	58,33	99,54
FZ-1-TSD-TD01-053	350	1100	53,03	99,17
FZ-1-TSD-TD01-054	350	1200	48,61	99,46
FZ-1-TSD-TD01-055	400	1000	66,67	99,43
FZ-1-TSD-TD01-056	400	1100	60,61	99,66
FZ-1-TSD-TD01-057	400	1200	55,56	99,29
FZ-1-TSD-TD01-058	400	1300	51,28	99,37
FZ-1-TSD-TD01-059	225	658	56,99	98,43
FZ-1-TSD-TD01-060	275	805	56,94	99,31

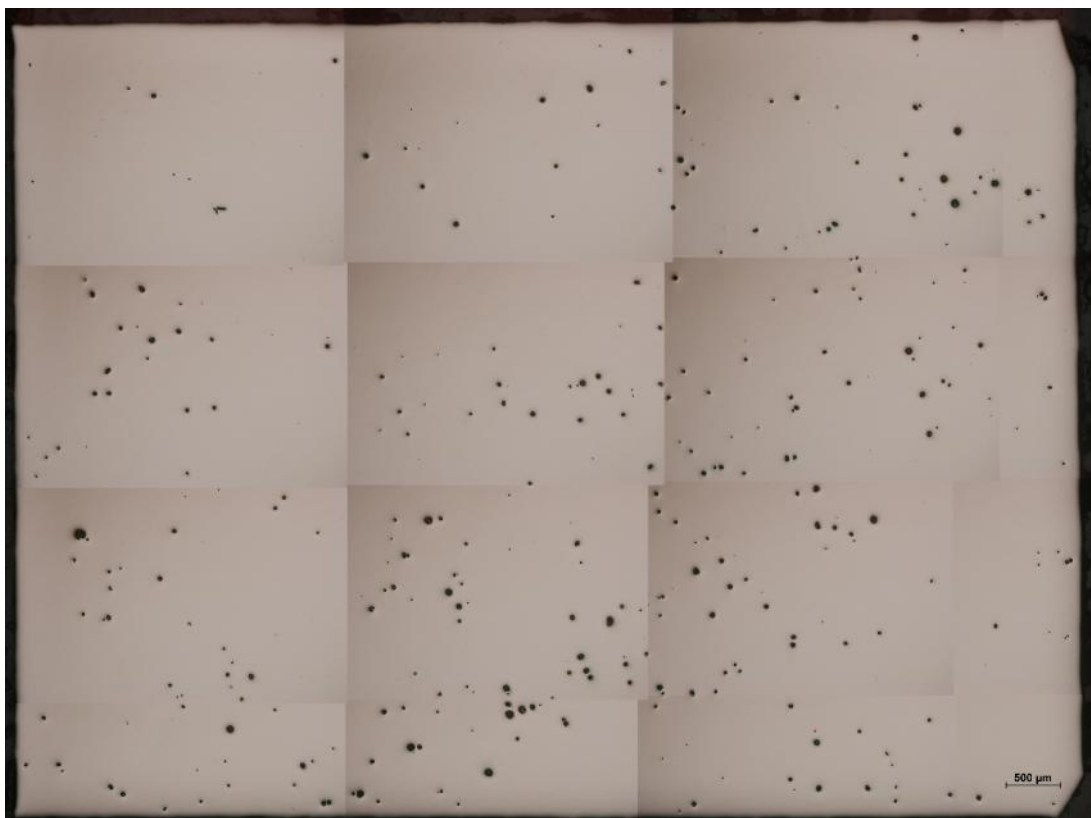
Příloha 5 Přehled vyleštěných rovinných vzorků

Hatch distance: 120 μ m	t=0,5 mm	t=1 mm	t=1,5 mm	t=2 mm	t=2,5 mm	t=3 mm
1 Výkon laseru: 275 W Rychlost skenování: 900 mm/s	 98,96%	 98,11%	 99,11%	 99,26%	 99,55%	 99,66%
2 Výkon laseru: 255 W Rychlost skenování: 750 mm/s	 98,89%	 98,25%	 98,38%	 98,93%	 99,39%	 99,24%
3 Výkon laseru: 225 W Rychlost skenování: 658 mm/s	 99,03%	 97,08%	 99,49%	 99,29%	 99,20%	 99,57%
4 Výkon laseru: 125 W Rychlost skenování: 400 mm/s	 99,07%	 99,31%	 99,37%	 99,65%	 99,55%	 99,82%
5 Výkon laseru: 125 W Rychlost skenování: 200 mm/s	 98,90%	 97,70%	 97,75%	 98,61%	 99,53%	 99,46%

Příloha 6 Přehled vyleštěných kruhových vzorků

Hatch distance: 120 μm	t=2 mm	t=1,5 mm	t=1 mm
Výkon laseru: 275 W Rychlost skenování: 900 mm/s	98,00% 	99,11% 	98,84% 
Výkon laseru: 255 W Rychlost skenování: 750 mm/s	98,55% 	98,97% 	98,55% 
Výkon laseru: 225 W Rychlost skenování: 658 mm/s	97,83% 	99,06% 	97,45% 
Výkon laseru: 125 W Rychlost skenování: 400 mm/s	98,99% 	98,96% 	98,80% 
Výkon laseru: 125 W Rychlost skenování: 200 mm/s	97,17% 	95,46% 	95,17% 

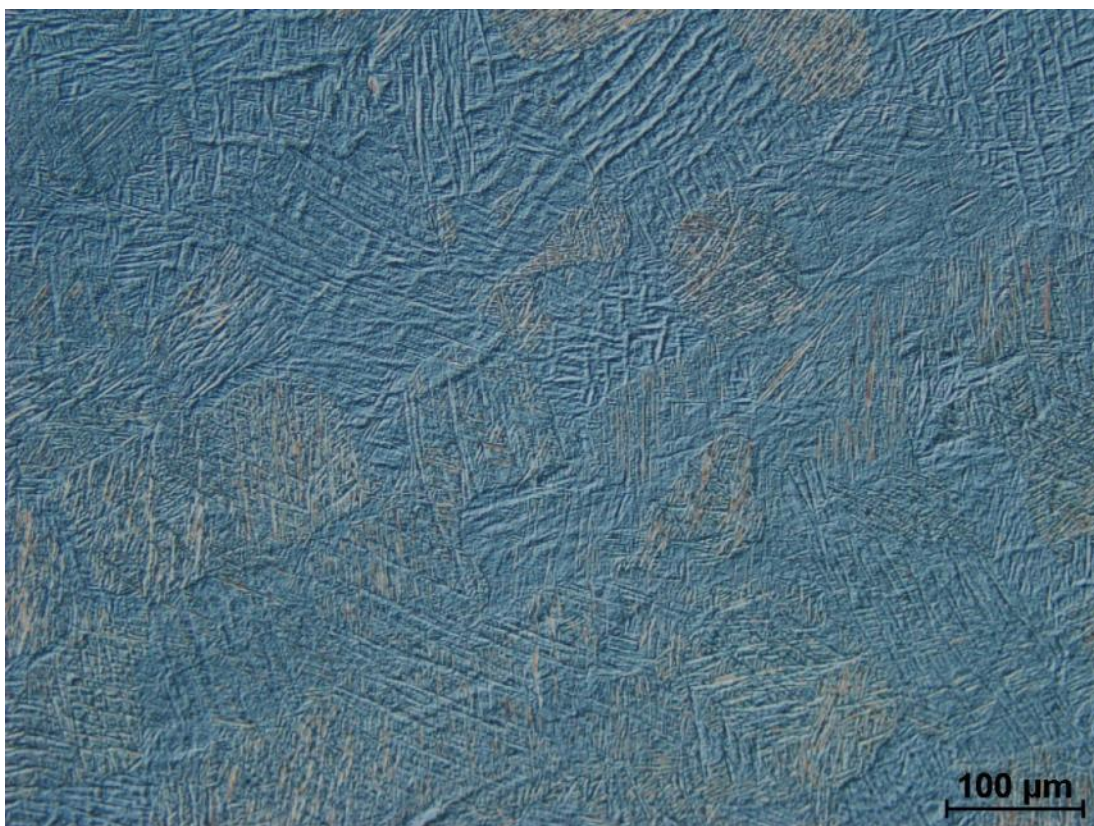
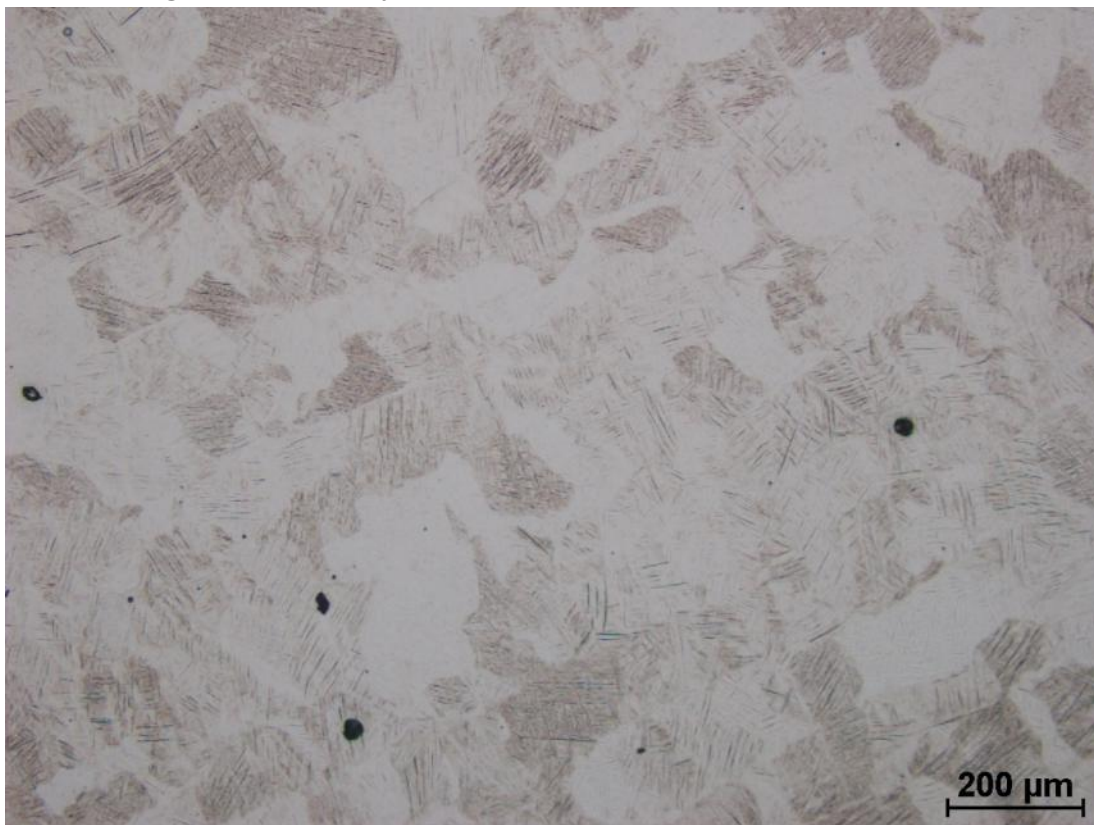
Příloha 7 Fotografie vyleštěného řezu vzorkem pro test vrubové houževnatosti

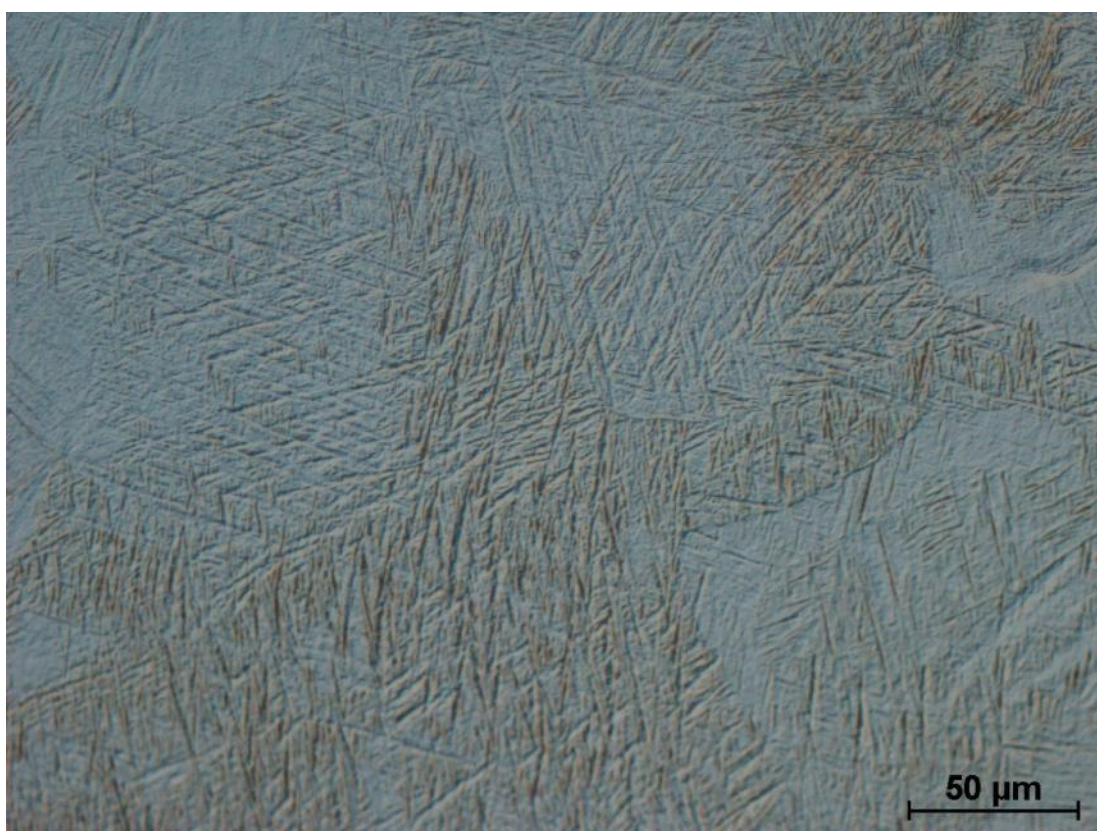


Příloha 8 Fotografie vyleštěného řezu vzorkem pro test vysokocyklové únavy



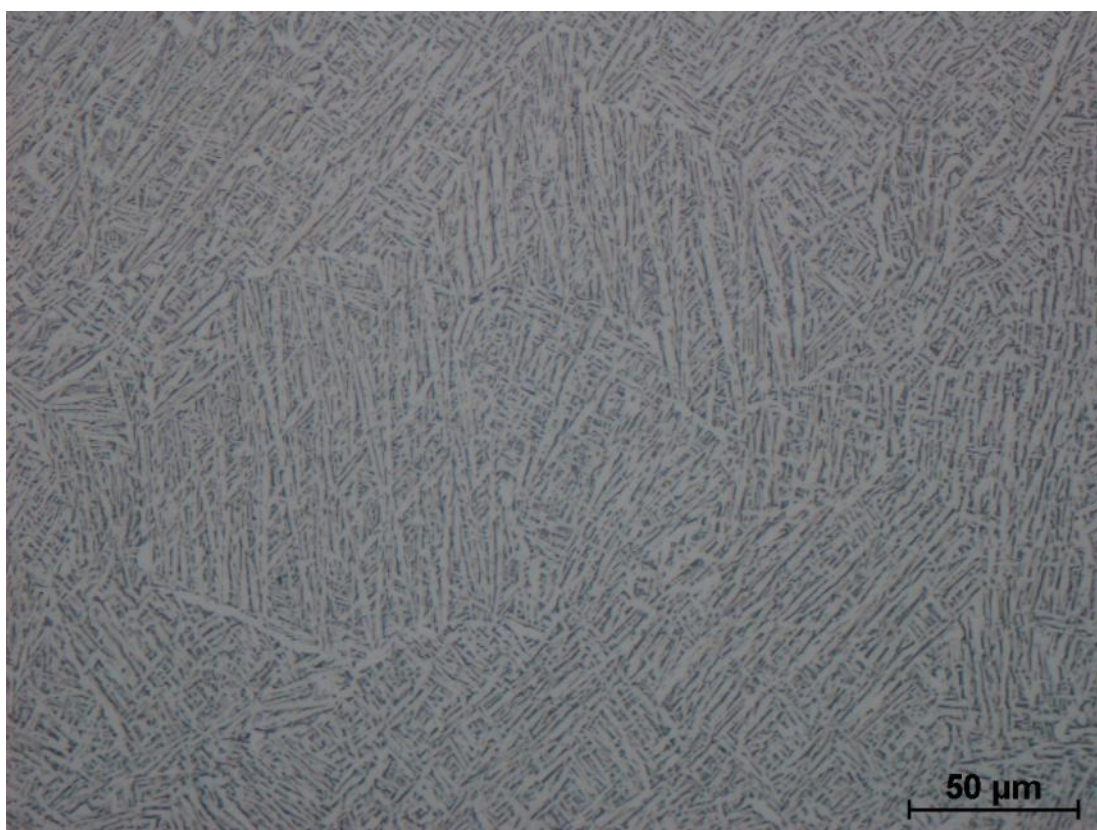
Příloha 9 Fotografie mikrostruktury T1





Příloha 10 Fotografie mikrostruktury T2





Test report

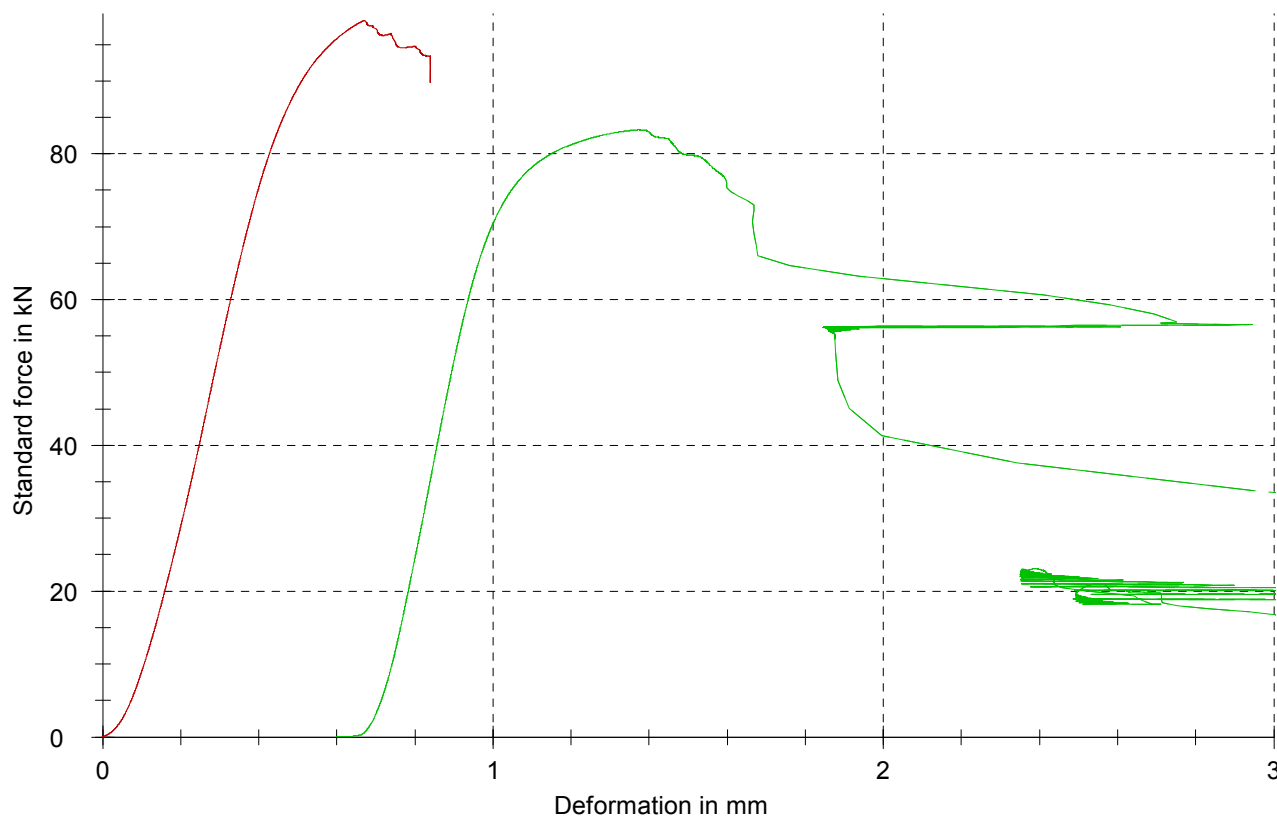
Customer : Doc. D. Koutný - Dipl. práce
 Test standard : ČSN EN ISO 604
 Material : TiAl6V4
 Specimen type : Kostka 18 mm - struktura
 Tester : Ing. Josef Zapletal, Ph.D.
 Note : Ed: Seèna mezi 40 a 60 kN
 Machine data : Zwick/Roell Z250, Loadcell: 150 kN, Sensor: MultiXtens

Pre-load : 20 N Speed crush yield point : 2 mm/min
 Speed, compression modulus : 2 mm/min Test speed : 2 mm/min

Test results:

Legend	Specimen ID	Notes	a ₀ mm	b ₀ mm	h ₀ mm	E _d kN/mm	F _m kN	σ _{dM} MPa	ε _{dtM} mm	ε _{dM} mm
	1	Ti-1	18	18	18,32	248	98,28	303,34	0,7	0,2
	2	Ti-2	18	18	18,16	251	83,29	257,08	0,8	0,3

Series graph:



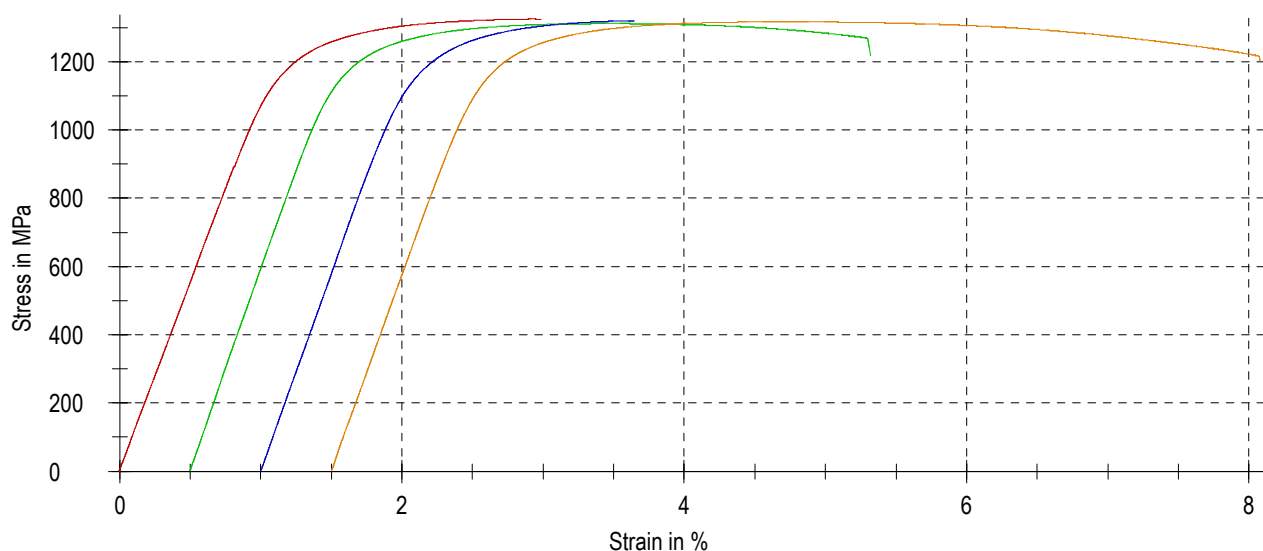
Test report

Customer : Doc. Koutny, Dipl. prace
 Test standard : CSN EN ISO 6892-1, 20 °C
 Material : SLM TiAl6V4
 Specimen type : DIN 50125, form "B", 6 x 30 mm
 Tester : Dr. J. Zapletal
 Machine data : Zwick Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens

Test results:

Legend	Specimen ID	Notes	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A %	Z %
	Ti-1	20 °C	6,010	30,00	109	1219	1325	1,7	1,8	5,3
	Ti-2	20 °C	6,017	30,00	118	1206	1312	1,8	3,8	14,0
	Ti-3	20 °C	6,021	30,01	115	1211	1320	1,5	1,5	2,7
	Ti-4	20 °C	6,010	30,01	115	1204	1317	2,1	5,5	12,9

Series graph:



Statistics:

Series n = 4	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A %	Z %
\bar{x}	6,015	30,01	114	1210	1318	1,8	3,2	8,7
med	6,014	30,00	115	1209	1318	1,8	2,8	9,1
s	0,005	0,00	4	7	5	0,3	1,9	5,6
v	0,09	0,01	3,09	0,54	0,42	14,18	59,96	64,24
max	6,021	30,01	118	1219	1325	2,1	5,5	14,0
min	6,010	30,00	109	1204	1312	1,5	1,5	2,7

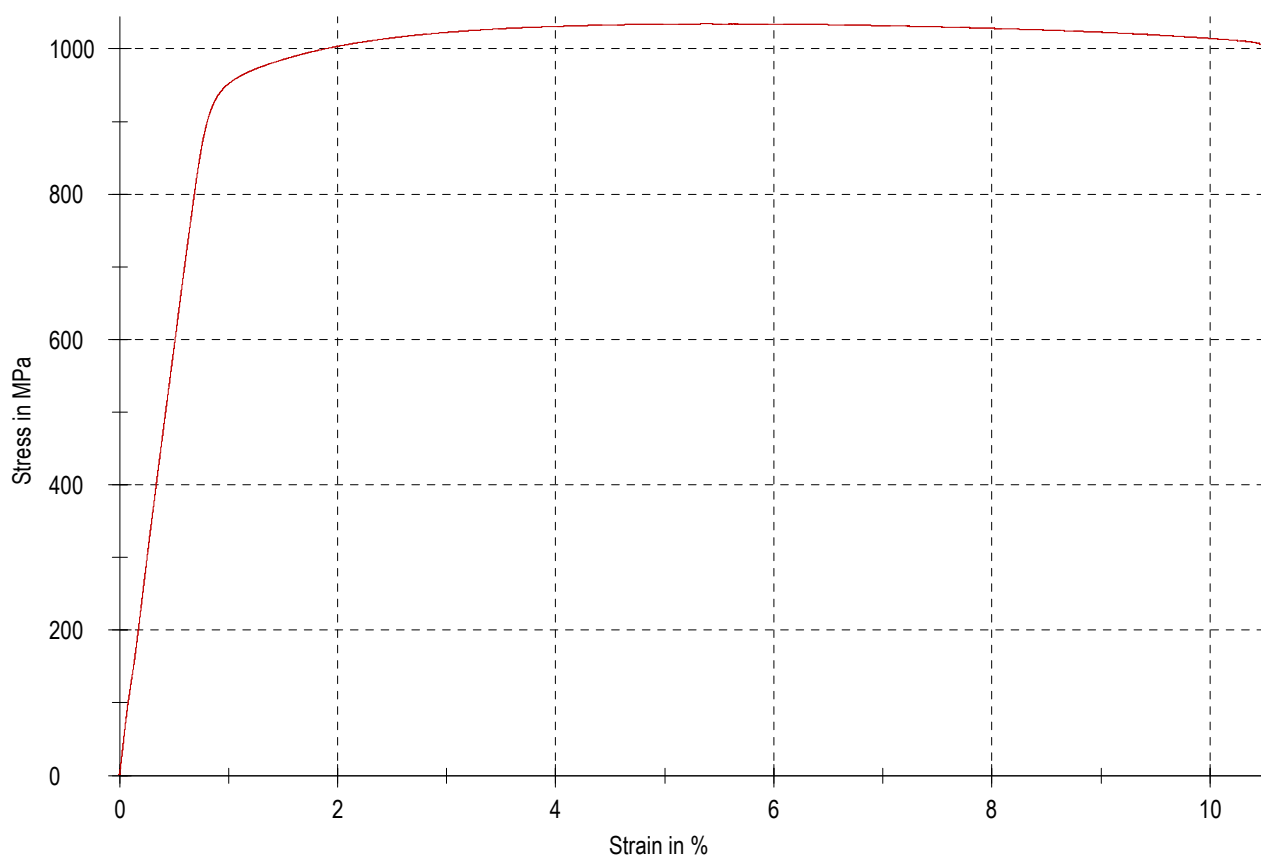
Test report

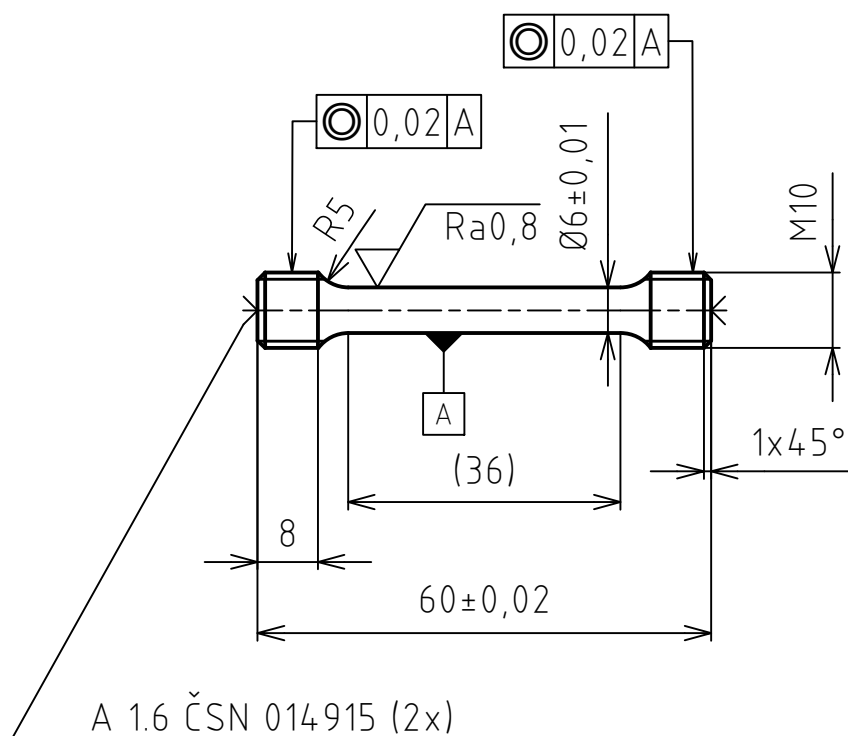
Customer : Doc. D. Koutný-Diplomka
 Test standard : CSN EN ISO 6892-1
 Material : TiAl6V4 (SLM)
 Specimen type : 6x30 mm, DIN 50125, Form B
 Tester : Ing. Josef Zapletal, Ph.D
 Machine data : Zwick Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer:MultiXtens, Crosshead speed: 1 mm/min
 Pre-load : 2 MPa Speed, yield point : 1 mm/min
 Speed, E-Modulus : 1 mm/min Test speed : 2 mm/min

Test results:

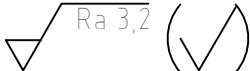
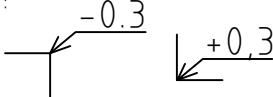


Legend	Specimen ID	Notes	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	F _m N	R _m MPa	R _B MPa	A _g %	A %	Z %
	1	Ti-5	6,013	30,04	118	953	29371	1030	1010	4,5	9,6	14,5

Series graph:

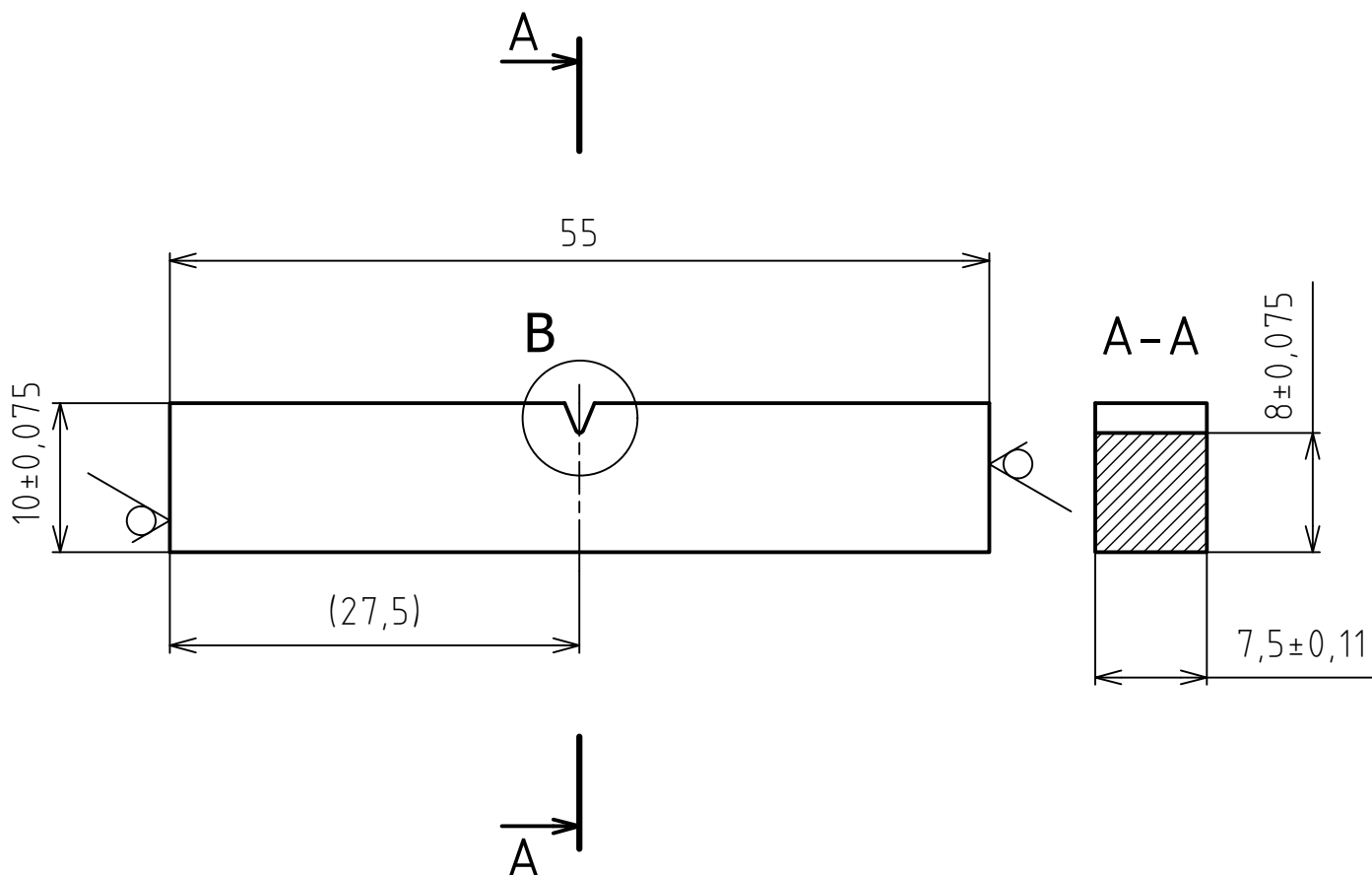




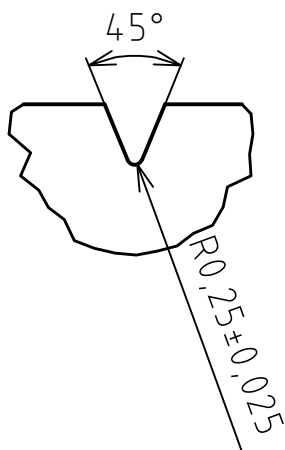
4 kusy

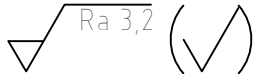
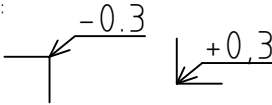


Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko 1 : 1	Přesnost: ISO 2768-mH Tolerování: ISO 8015 Promítání 
Materiál: Ti6Al4V		Polotovár:		Hmotnost 0,01 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
 ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název Tahová zkouška		
	Kreslil: JAKUB KUBRICKÝ				
	Schválil:		Číslo dokumentu 01__A4__01		
	Datum vydání: 5.1.2017				
			List: /		

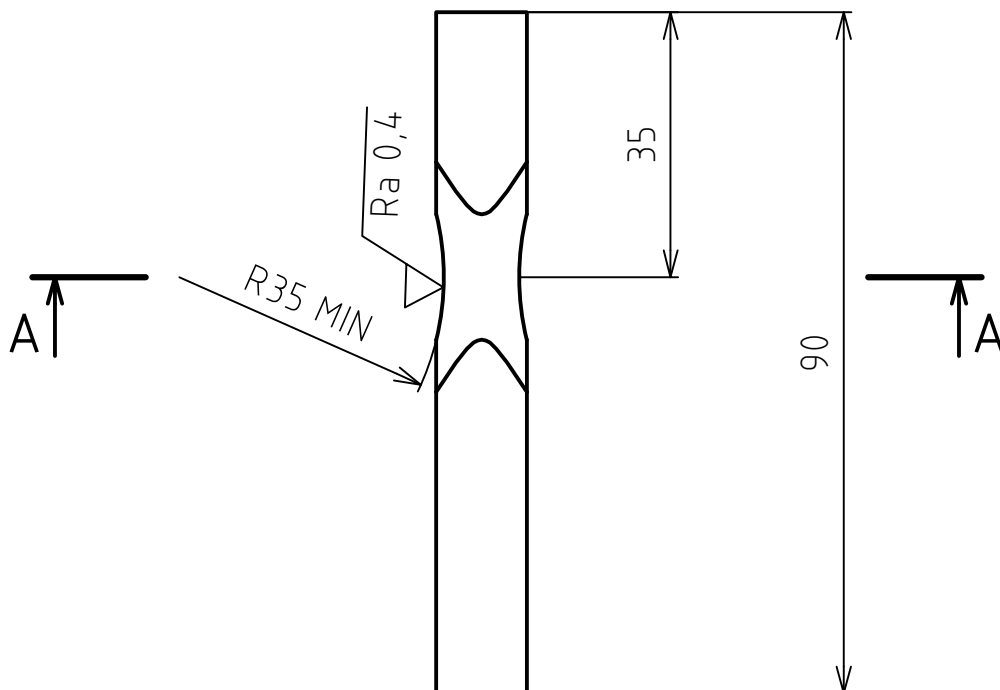
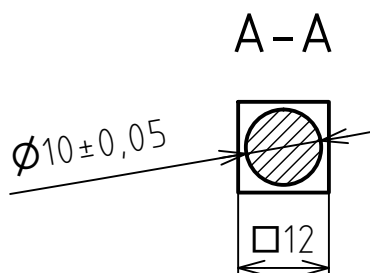
List: /



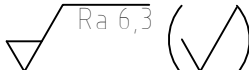
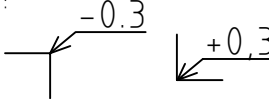


B (4 : 1)



Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko 2 : 1	Přesnost: ISO 2768-mH Tolerování: ISO 8015 Promítání 
Materiál: Ti6Al4V		Polotovár:		Hmotnost 0,02 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
 ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název CHARPY TEST		
	Kreslil: JAKUB KUBRICKÝ				
	Schválil:		Číslo dokumentu 01__A4__02		
	Datum vydání: 15.2.2017				
			List: /		



9 kusů

Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko 1 : 1	Přesnost: ISO 2768-mH Tolerování: ISO 8015 Promítání 
Materiál: Ti6Al4V		Polotovár:		Hmotnost 0,05 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
 ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název VZOREK ÚNAVA		
	Kreslil: JAKUB KUBRICKÝ				
	Schválil:		Číslo dokumentu 		